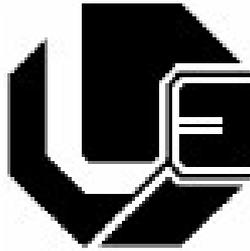


**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA ELÉTRICA**



**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**APLICAÇÃO DO SOFTWARE SCICOSLAB PARA  
ANÁLISE DO CONTROLE AUTOMÁTICO DE  
GERAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE  
POTÊNCIA**

**GEORGE ODA**

**JUNHO / 2012**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA ELÉTRICA**

**APLICAÇÃO DO SOFTWARE SCICOSLAB  
PARA ANÁLISE DO CONTROLE AUTOMÁTICO  
DE GERAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE  
POTÊNCIA**

**Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, por  
George Oda, como parte dos requisitos necessários para obtenção do  
Título de Mestre em Ciências, aprovado em 22 de junho de 2012.**

**Banca Examinadora**

**Geraldo Caixeta Guimarães, PhD (UFU) – Orientador  
Claudio Lemos de Souza, Dr (UFG)  
Adélio José de Moraes, Dr (UFU)**

**Uberlândia, 22 de junho de 2012**

**APLICAÇÃO DO SOFTWARE SCICOSLAB PARA ANÁLISE  
DO CONTROLE AUTOMÁTICO DE GERAÇÃO DE SISTEMA  
ELÉTRICOS DE POTÊNCIA.**

**GEORGE ODA**

Dissertação apresentada por George Oda à Universidade Federal de Uberlândia  
para obtenção do título de Mestre em Ciências.

---

Prof. Geraldo Caixeta Guimarães, PhD

Orientador

---

Prof. Alexandre Cardoso, Dr

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

## **A Idade de Ser Feliz**

Existe somente uma idade para ser feliz.

Somente uma época na vida de cada pessoa em que é possível sonhar e fazer planos.

Ter bastante energia para viver, apesar de todas as dificuldades e obstáculos.

Uma só idade para a gente se encantar com a vida, viver alegremente e desfrutar tudo com toda intensidade.

Fase dourada em que a gente pode criar e recriar a vida à nossa imagem, sorrindo, cantando, brincando e dançando.

Vestir com todas as cores sem preconceitos nem pudor.

Tempo de entusiasmo e de coragem, em que todo desafio é convite a lutar com muita disposição de se tentar algo de novo e quantas vezes for preciso.

Essa idade se chama PRESENTE e é tão passageira que tem apenas a duração do instante que passa.

Aproveite o máximo cada instante de sua vida, com muita disposição e alegria.

Crie em sua vida motivos suficientes para ser verdadeiramente feliz, seja qual for sua idade.

Dedico este trabalho aos meus pais, Shoyi (in memoriam) e Kazuko, a minha esposa Maria Lucia, aos meus filhos George, Gislaine e Amanda pela compreensão, apoio e carinho, essenciais para o desenvolvimento desta dissertação.

# Aplicação do Software ScicosLab para Análise do Controle Automático de Geração de Sistemas Elétricos de Potência

## RESUMO

A proposta deste trabalho é mostrar que o *software ScicosLab* pode ser utilizado como uma ferramenta computacional, interessante e eficaz, para analisar o controle automático de geração de sistemas elétricos de potência.

Inicialmente é apresentado o software e, em seguida, os conceitos de movimentos rotativos que permitem desenvolver os modelos matemáticos para os geradores equipados com turbinas a vapor ou hidráulica e reguladores de velocidade, e para suas cargas elétricas.

Para possibilitar os estudos é utilizado um sistema constituído por duas áreas distintas interligadas, onde é simulado um aumento de carga em uma destas áreas, sem e com a linha de interligação, desconsiderando e, em seguida, considerando os controles primário e suplementar.

Finalmente, analisa-se um sistema mais realístico com três áreas distintas extraído do sistema elétrico brasileiro.

Os resultados computacionais mostram graficamente as variações das duas principais grandezas de interesse: a frequência de cada área do sistema e a potência da linha de interligação. Estas grandezas permitem avaliar o comportamento do sistema após uma perturbação que afeta o balanço geração-carga.

Considerando o exposto acima, constata-se que o pacote computacional *ScicosLab* modela e simula eficazmente o controle carga-frequência de sistemas elétricos de potência, qualificando-se, portanto, como uma excelente alternativa para substituir qualquer programa similar que exige pagamento de licença.

**Palavras-chave:** Controle Automático de Geração; Controle Carga-Frequência, Dinâmica; *ScicosLab*; Sistema Elétrico de Potência.

# Application of ScicosLab Software for Analysis of Automatic Generation Control of Electric Power Systems

## ABSTRACT

The purpose of this paper is to show that the *software ScicosLab* can be used as an interesting and effective computational tool to analyze the automatic generation control of electric power systems.

Firstly it is presented the software and, afterwards, the concepts and definitions of rotational movements in order to develop mathematical models for the generators equipped with steam turbines or hydraulic turbines and speed governors, and for their electrical loads.

For the studies it is used a system comprised by two distinct interconnected areas where a load increase in one area is simulated without/with the tieline, ignoring, and then considering the primary and supplementary controls.

Finally, it is analyzed a more realistic system with three distinct areas extracted from the Brazilian power system.

The computational results show graphically the variations of the two main quantities of interest: the frequency of each area of the system and the tieline power. These quantities allow the evaluation of the system behavior after a disturbance that affects the generation-load balance.

Within the above context, it is verified that the *ScicosLab* computer package effectively models and simulates the load-frequency control of power systems, qualifying, therefore, as an excellent alternative to replace any similar program which requires license payment.

**Keywords:** Automatic Generation Control; Load-Frequency Control, Dynamics; *ScicosLab*; Electric Power System.

# SUMÁRIO

<b>Capítulo I – INTRODUÇÃO GERAL</b>	<b>1</b>
<b>1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>1.2 JUSTIFICATIVAS</b>	<b>1</b>
<b>1.2.1 O software ScicosLab</b>	<b>1</b>
<b>1.2.2 Análise da dinâmica e controle da geração</b>	<b>2</b>
<b>1.3 OBJETIVO GERAL</b>	<b>3</b>
<b>1.4 ESTADO DA ARTE</b>	<b>3</b>
<b>1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO</b>	<b>5</b>
<b>Capítulo II – MODELAGEM DE SISTEMA DE POTÊNCIA</b>	<b>7</b>
<b>2.1 INTRODUÇÃO</b>	<b>7</b>
<b>2.2 CONCEITOS BÁSICOS DA MECÂNICA DE ROTAÇÃO</b>	<b>7</b>
<b>2.3 MODELAGEM DE GERADOR</b>	<b>10</b>
<b>2.4 MODELAGEM DE CARGA</b>	<b>16</b>
<b>2.4.1 Carga tipo impedância constante</b>	<b>17</b>
<b>2.4.2 Cargas tipo motores de indução</b>	<b>19</b>
<b>2.4.3 Amortecimento da carga do sistema</b>	<b>21</b>
<b>2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>23</b>
<b>Capítulo III – MÁQUINAS MOTRIZES E SISTEMAS DE FORNECIMENTO DE ENERGIA</b>	<b>24</b>
<b>3.1 INTRODUÇÃO</b>	<b>24</b>
<b>3.2 TURBINAS A VAPOR</b>	<b>24</b>
<b>3.2.1 Modelos de turbina a vapor</b>	<b>27</b>
<b>3.2.2 Efeitos de caldeiras na turbina a vapor</b>	<b>31</b>
<b>3.2.3 Modelo representativo do processo de caldeira</b>	<b>34</b>
<b>3.3 TURBINAS HIDRÁULICAS</b>	<b>37</b>

<b>3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>44</b>
<b>Capítulo IV – CONTROLE PRIMÁRIO DE CARGA-FREQUÊNCIA</b>	<b>45</b>
<b>4.1 INTRODUÇÃO</b>	<b>45</b>
<b>4.2 REGULADOR ISÓCRONO</b>	<b>45</b>
<b>4.3 REGULADOR COM QUEDA DE VELOCIDADE</b>	<b>48</b>
<b>4.4 REGULADOR DE VELOCIDADE COM COMPENSAÇÃO DE QUEDA TRANSITÓRIA</b>	<b>50</b>
<b>4.5 COMPORTAMENTO DO CONTROLE PRIMÁRIO DE CARGA-FREQUÊNCIA</b>	<b>55</b>
<b>4.5.1 Regulação de Velocidade de Área Isolada</b>	<b>55</b>
<b>4.5.2 Regulação de Velocidade de Duas Áreas Interligadas</b>	<b>67</b>
<b>4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>75</b>
<b>Capítulo V – CONTROLE AUTOMÁTICO DA GERAÇÃO OU CONTROLE SUPLEMENTAR</b>	<b>76</b>
<b>5.1 INTRODUÇÃO</b>	<b>76</b>
<b>5.2 CONTROLE SUPLEMENTAR EM SISTEMAS DE POTÊNCIA ISOLADOS</b>	<b>77</b>
<b>5.3 CONTROLE SUPLEMENTAR EM SISTEMAS DE POTÊNCIA INTERLIGADOS</b>	<b>84</b>
<b>5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>95</b>
<b>Capítulo VI – ANÁLISE DO CONTROLE AUTOMÁTICO DE FREQUÊNCIA DE UM SISTEMA CONSTITUIDO POR TRÊS ÁREAS INTERLIGADAS</b>	<b>96</b>
<b>6.1 INTRODUÇÃO</b>	<b>96</b>
<b>6.2 ÁREAS CONSIDERADAS PARA SIMULAÇÃO</b>	<b>96</b>
<b>6.3 CASOS DE SIMULAÇÃO</b>	<b>99</b>
<b>6.3.1 Caso 1: As Três Áreas Operando Isoladamente</b>	<b>99</b>
<b>6.3.2 Caso 2: As Três áreas Interligadas</b>	<b>102</b>

<b>6.3.3 Caso 3: As Três Áreas Interligadas sob ação do Controle Primário</b>	<b>118</b>
<b>6.3.4 Caso 4: As Três Áreas Interligadas sob ação do Controle Suplementar</b>	<b>128</b>
<b>6.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>146</b>
<b>Capítulo VII – CONCLUSÃO</b>	<b>148</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>150</b>
<b>Anexo I - RESULTADOS COMPARATIVOS DOS PROGRAMAS SCICOSLAB E MATLAB/SIMULINK</b>	<b>151</b>

# LISTA DE ILUSTRAÇÕES

## Capítulo II – MODELAGEM DE SISTEMA DE POTÊNCIA

Figura 2.1 – Gerador síncrono elementar de 2 polos	11
Figura 2.2 – Diagrama vetorial das ondas de $f_{mm}$	11
Figura 2.3 – Diagrama de blocos do gerador	16
Figura 2.4 – Características das cargas de impedância constante em função da frequência	18
Figura 2.5 – Circuito elétrico equivalente de um motor de indução (Todas as grandezas do rotor estão referidas ao estator)	19
Figura 2.6 – Diagrama de blocos do conjunto Gerador – Carga (carga conectada com característica de amortecimento)	21

## Capítulo III – MÁQUINAS MOTRIZES E SISTEMAS DE FORNECIMENTOS DE ENERGIA

Figura 3.1 – Arranjo esquemático de uma turbina a vapor sem reaquecimento	25
Figura 3.2 – Configuração típica de uma turbina a vapor com reaquecimento	26
Figura 3.3 – Função de transferência para turbina a vapor sem reaquecimento	28
Figura 3.4 – Esquema de funcionamento de uma turbina a vapor com reaquecimento	28
Figura 3.5 – Resposta da potência de uma turbina com reaquecimento para uma variação em degrau na posição da válvula de controle	30
Figura 3.6 – Esquema do sistema da turbina – caldeira	32
Figura 3.7 – Simulação elétrica do fenômeno de fluxo de pressão da caldeira	32
Figura 3.8 – Diagrama de blocos simplificado do processo da caldeira	35.
Figura 3.9 – Variação de 5 % na válvula da turbina para caldeira sem controle e entrada permanente de combustível	36
Figura 3.10 – Arranjo esquemático de uma usina hidroelétrica	37
Figura 3.11 – Turbina hidráulica ressaltando a tubulação forçado	39
Figura 3.12 – Resposta de uma turbina hidráulica típica a uma variação na posição das palhetas	42
Figura 3.13 – Diagrama de blocos para as turbinas hidráulicas	43

## Capítulo IV – CONTROLE PRIMÁRIO DE CARGA-FREQUÊNCIA

Figura 4.1 – Esquema de regulador de velocidade do tipo “isócrono”	46
Figura 4.2 – Diagrama de blocos do regulador de velocidade (tipo isócrono)	47
Figura 4.3 – Esquema de regulador de velocidade do tipo “queda de velocidade”	48

Figura 4.4 – Diagrama de blocos do regulador com queda de velocidade	49
Figura 4.5 – Diagrama de bloco da função transferência do regulador com queda de velocidade	49
Figura 4.6 – Resposta das válvulas controladas pelo regulador de velocidade	50
Figura 4.7 – Esquema de um regulador de velocidade com realimentação transitória	51
Figura 4.8 – Diagrama de blocos de um regulador de velocidade com realimentação transitória	52
Figura 4.9 – Diagrama de blocos função transferência do compensador de velocidade com queda transitória	53
Figura 4.10 – Características dos três tipos de reguladores de velocidade	54
Figura 4.11 – Diagrama de blocos de uma área isolada com três máquinas com seus reguladores de velocidades	55
Figura 4.12 – Simplificação final no diagrama de bloco do desvio de frequência	56
Figura 4.13 – Diagrama de blocos da Turbina a vapor <u>sem</u> reaquecimento	58
Figura 4.14 – Desvio de frequência $p\delta$ da turbina a vapor <u>sem</u> reaquecimento	58
Figura 4.15 – Diagrama de blocos da Turbina a vapor <u>com</u> reaquecimento	59
Figura 4.16 – Desvio de frequência $p\delta$ da Turbina a vapor <u>com</u> reaquecimento	59
Figura 4.17 – Desvio de frequência $p\delta$ da turbina a vapor para os dois casos: <u>sem</u> reaquecimento (vermelho), <u>com</u> reaquecimento (preto)	60
Figura 4.18 – Diagrama de blocos da Turbina hidráulica	61
Figura 4.19 – Desvio de frequência $p\delta$ da Turbina hidráulica	61
Figura 4.20 – Variação da carga (acrécimo) em degrau e a natureza da resposta do desvio de frequência	63
Figura 4.21 – Desvio efetiva da frequência $p\delta$ (vermelho) da Turbina a vapor <u>sem</u> reaquecimento e a variação de carga (preto) com o regulador bloqueado	63
Figura 4.22 – Natureza da resposta do desvio de frequência para uma turbina a vapor sem reaquecimento para a mesma variação de carga (acrécimo)	64
Figura 4.23 – Desvio efetiva de frequência $p\delta$ da Turbina a vapor sem reaquecimento com o regulador desbloqueado	64
Figura 4.24 – Natureza da resposta do desvio de frequência para uma turbina hidráulica para a mesma variação de carga (acrécimo)	65
Figura 4.25 – Desvio de frequência $p\delta$ da Turbina hidráulica	65
Figura 4.26 – Característica típica de regulação de velocidade de uma máquina	66
Figura 4.27 – Diagrama de blocos de um sistema interligado com duas áreas com uma única máquina motriz em cada área	69
Figura 4.28 – Diagrama de blocos convencional de um sistema com duas áreas interligadas	71
Figura 4.29 – Diagrama de blocos do ScicosLab de um sistema com duas áreas interligadas	71
Figura 4.30 – Variação da Carga	72

Figura 4.31 – Desvios de frequências $p\delta_1$ (preto) e $p\delta_2$ (vermelho)	73
Figura 4.32 – Variação da Potência $\Delta P_{TL12}$	74
Figura 4.33 – Variação da Potência do gerador da área 1 (preto) da área 2(vermelho)	74

## **Capítulo V – CONTROLE AUTOMÁTICO DA GERAÇÃO OU CONTROLE SUPLEMENTAR**

Figura 5.1 – Diagrama de blocos de um sistema de potência isolado (unidade a vapor com reaquecimento) identificando a ação de controle suplementar	78
Figura 5.2 – Diagrama de blocos de um sistema de potência isolado (unidade hidráulica) identificando a ação de controle suplementar	78
Figura 5.3 – Comportamento da frequência em uma área isolada típica – sem e com controle suplementar – seguindo a uma variação em degrau na carga	79
Figura 5.4 – Diagrama de blocos da Turbina a vapor <u>com</u> reaquecimento e controle suplementar	80
Figura 5.5 – Variação em degrau da carga	80
Figura 5.6 – Comportamento da frequência em uma área isolada (unidade a vapor com reaquecimento) – controle primário (vermelho) e controle suplementar (preto)	81
Figura 5.7 – Diagrama de blocos da Turbina hidráulica com controle suplementar	82
Figura 5.8 – Comportamento da frequência em uma área isolada (unidade hidráulica) – controle primário (vermelho) e controle suplementar (preto)	83
Figura 5.9 – Diagrama de blocos de 2 áreas (com controle suplementarem tracejado)	87
Figura 5.10 – Diagrama de blocos de duas áreas sem controle suplementar	89
Figura 5.11 – Desvio de frequência $p\delta$ onde $p\delta_1$ (preto) e $p\delta_2$ (vermelho)	90
Figura 5.12 – Variação da Potência na linha de interligação $\Delta P_{TL12}$	90
Figura 5.13 - Diagrama de blocos de duas áreas com controle suplementar	92
Figura 5.14 – Variação da frequência $p\delta_1$ <u>com</u> controle suplementar (preto), <u>sem</u> controle suplementar (vermelho)	93
Figura 5.15 – Variação da frequência $p\delta_2$ <u>com</u> controle suplementar (preto), <u>sem</u> controle suplementar (vermelho)	93
Figura 5.16 – Variação da potência de interligação $\Delta P_{TL12}$ , <u>com</u> controle suplementar (preto), <u>sem</u> controle suplementar (vermelho)	94

## **Capítulo VI – ANÁLISE DO CONTROLE AUTOMÁTICO DE FREQUÊNCIA DE UM SISTEMA CONSTITUÍDO POR TRÊS ÁREAS INTERLIGADAS**

Figura 6.1 – Três áreas interligadas consideradas nas simulações	97
Figura 6.2 – Diagrama de blocos para simulação da área 1 isoladamente	99
Figura 6.3 – Variação da carga $\Delta L_1$ (preto) e desvio da frequência $p\delta_1$ (vermelho) de um sistema isolado	100
Figura 6.4 – Diagrama de blocos para simulação da área 2 isoladamente	100

Figura 6.5 – Variação da carga $\Delta L_2$ (preto) e variação da frequência $p\delta_2$ (vermelho) de um sistema isolado	101
Figura 6.6 – Diagrama de blocos para simulação da área 3 isoladamente	101
Figura 6.7 – Variação da carga $\Delta L_3$ (preto) e variação da frequência $p\delta_3$ (vermelho) de um sistema isolado	102
Figura 6.8 – Diagrama de blocos para três áreas interligadas sem atuação de nenhum tipo de controle	103
Figura 6.9 – Diagrama de blocos para simulação com as três áreas interligadas, sem regulador	105
Figura 6.10 – Variação da frequência $p\delta_1$	106
Figura 6.11 – Variação da frequência $p\delta_2$	106
Figura 6.12 – Variação da frequência $p\delta_3$	107
Figura 6.13 – Variação da frequência $p\delta_1$ (preto), $p\delta_2$ (verde) e $p\delta_3$ (vermelho)	107
Figura 6.14 – Variação da Potência de Interligação $\Delta P_{TL12}$	108
Figura 6.15 – Variação da Potência de Interligação $\Delta P_{TL23}$	108
Figura 6.16 – Variação da Potência de Interligação $\Delta P_{TL31}$	109
Figura 6.17 – Variação da Potência de Interligação entre Áreas $\Delta P_{TL12}$ (preto), $\Delta P_{TL23}$ (verde) e $\Delta P_{TL31}$ (vermelho)	109
Figura 6.18 – Diagrama de blocos para simulação com as três áreas interligadas, sem regulação	111
Figura 6.19 – Variação da carga $\Delta L_1$ (preto), $\Delta L_2$ (verde) e $\Delta L_3$ (vermelho)	111
Figura 6.20 – Desvio de frequência da área 1 - $p\delta_1$ (preto)	112
Figura 6.21 – Desvio de frequência da área 2 - $p\delta_2$ (verde)	112
Figura 6.22 – Variação da frequência $p\delta_3$ (vermelho)	113
Figura 6.23 – Variação da frequência $p\delta_1$ (preto), $p\delta_2$ (verde) e $p\delta_3$ (vermelho)	113
Figura 6.24 – Variação da Potência de Interligação $\Delta P_{TL12}$	114
Figura 6.25 – Variação da Potência de Interligação $\Delta P_{TL23}$	115
Figura 6.26 – Variação da Potência de Interligação $\Delta P_{TL31}$	116
Figura 6.27 – Variação da Potência de Interligação entre Áreas $\Delta P_{TL12}$ (preto), $\Delta P_{TL23}$ (verde) e $\Delta P_{TL31}$ (vermelho)	116
Figura 6.28 – Diagrama de blocos para simulação com três áreas interligadas sob a ação do controle primário, com a variação da carga nas três áreas	117
Figura 6.29 – Diagrama de blocos para simulação com três áreas interligadas sob a ação do controle primário e com a variação da carga apenas na área 1	122
Figura 6.30 – Variação da frequência $p\delta_1$ (preto), $p\delta_2$ (verde) e $p\delta_3$ (vermelho)	123
Figura 6.31 – Variação da Potência de Interligação $\Delta P_{TL12}$	124

Figura 6.32 – Variação da Potência de Interligação $\Delta P_{TL23}$	124
Figura 6.33 – Variação da Potência de Interligação $\Delta P_{TL31}$	125
Figura 6.34 – Variação da Potência de Interligação $\Delta P_{TL12}$ (preto), $\Delta P_{TL23}$ (verde) e $\Delta P_{TL31}$ (vermelho)	126
Figura 6.35 – Variação da Potência de Geração $\Delta P_{G1}$ (preto), $\Delta P_{G2}$ (verde) e $\Delta P_{G3}$ (vermelho)	127
Figura 6.36 – Diagrama de blocos para simulação de três áreas interligadas sob ação do controle suplementar	130
Figura 6.37 – Variação da Frequência $p\delta_1$ , <u>com</u> controle suplementar (preto)	131
Figura 6.38 – Variação da Frequência $p\delta_2$ , <u>com</u> controle suplementar (preto)	131
Figura 6.39 – Variação da Frequência $p\delta_3$ , <u>com</u> controle suplementar (preto)	132
Figura 6.40 – Variação da Frequência $p\delta_1$ (vermelho), $p\delta_2$ (verde) e $p\delta_3$ (azul), <u>sem</u> controle suplementar	132
Figura 6.41 – Variação da Potencia de interligação $\Delta P_{TL12}$ , <u>sem</u> controle suplementar (vermelho)	133
Figura 6.42 - Variação da Potencia de interligação $\Delta P_{TL23}$ , <u>sem</u> controle suplementar (verde)	134
Figura 6.43 - Variação da Potencia de interligação $\Delta P_{TL31}$ , <u>sem</u> controle suplementar (azul)	135
Figura 6.44 – Variação da Potência de interligação $\Delta P_{TL12}$ (vermelho), $\Delta P_{TL23}$ (verde) e $\Delta P_{TL31}$ (azul), <u>com</u> controle suplementar	135
Figura 6.45 – Diagrama de blocos para simulação de três áreas interligadas sob ação do controle suplementar	138
Figura 6.46 – Variação da Frequência $p\delta_1$ , <u>com</u> controle suplementar (preto)	139
Figura 6.47 – – Variação da Frequência $p\delta_2$ , <u>com</u> controle suplementar (preto)	139
Figura 6.48 – Variação da Frequência $p\delta_3$ , <u>com</u> controle suplementar (preto)	140
Figura 6.49 – Variação da Frequência $p\delta_1$ (vermelho), $p\delta_2$ (verde) e $p\delta_3$ (azul), <u>sem</u> controle suplementar	140
Figura 6.50 – Variação da Potencia de interligação $\Delta P_{TL12}$ , <u>sem</u> controle suplementar (vermelho)	141
Figura 6.51 - Variação da Potencia de interligação $\Delta P_{TL23}$ , <u>sem</u> controle suplementar (verde)	142
Figura 6.52 - Variação da Potencia de interligação $\Delta P_{TL31}$ , <u>sem</u> controle suplementar (azul)	143
Figura 6.53 – Variação da Frequência $p\delta_1$ (vermelho), $p\delta_2$ (verde) e $p\delta_3$ (azul), <u>sem</u> controle suplementar	143

# **LISTAS DE TABELAS**

## **Capítulo IV – CONTROLE PRIMÁRIO DE CARGA-FREQUÊNCIA**

Tabela I – Desvio de frequência e variação da potência nas linhas de interligação para uma alteração de carga 70

## **Capítulo VI – ANÁLISE DO CONTROLE AUTOMÁTICO DE FREQUÊNCIA DE UM SISTEMA CONSTITUÍDO POR TRÊS ÁREAS INTERLIGADAS**

Tabela II – Dados utilizados com acréscimo de carga somente na área 1 – Usina Termelétrica de Igarapé 104

Tabela III – Dados utilizados para operação isolada (500 MVA base) com variação de carga nas três áreas 110

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	área da tubulação
B	fator de inclinação do controle suplementar
c	proporção de potência ativa produzida pela turbina de alta pressão
CAG	controle automático de geração
$C_b$	constante de tempo do armazenamento da caldeira
D	característica de amortecimento da carga
E	módulo da tensão gerada
$\dot{E}$	fasor do módulo da tensão gerada
ECA	erro de controle de área
$E_c$	energia cinética
f	frequência
FF	controle plano de frequência
$f_{mm}$	força magnetomotriz
$F_r$	força magnetomotriz criada pelo campo, está alinhada com o eixo do rotor
$F_s$	força magnetomotriz criada pela reação da armadura (efeito magnético das correntes do estator)
$F_{sr}$	força magnetomotriz resultante
g	aceleração da gravidade
G	fator proporcional à posição das palhetas
H	constante de inércia / pressão hidráulica nas palhetas
$h_i$	entalpia do vapor de entrada
$h_o$	entalpia do vapor de saída
I	corrente alternada
$\dot{i}$	fasor da corrente alternada
$\dot{i}^*$	conjugado fasorial da corrente alternada
J	momento de inércia total da massa rotativa
$k_f$	ganho da ação integral do controle suplementar
K	coeficiente de atrito
$K_V$	coeficiente proporcional à abertura da válvula
L	comprimento da tubulação

M	quantidade de movimento angular (momentum)
$\dot{m}$	fluxo de massa do vapor
$\dot{m}_{s0}$	fluxo de massa de vapor de regime permanente no ponto de operação
N	número de espiras por fase
P	potência ativa
$P_{12}$	potência elétrica transferida do eixo do estator ao rotor
$p\delta$	desvio de frequência
$P_D$	pressão da caldeira
$P_m$	potencia mecânica da máquina motriz
$P_T$	pressão da válvula de controle
Q	potência reativa
R	resistência elétrica / regulação do estado de equilíbrio
r	regulação transitória
$r_h$	regulação transitória do sistema hidráulico
$rT_r/R$	constante de tempo de escoamento
$R_h$	regulação do estado de equilíbrio do sistema hidráulico
$R_s$	regulação do vapor sem reaquecimento
$R_r$	regulação do vapor com reaquecimento
S	potência aparente
$\dot{S}$	fasor da potência aparente
s	escorregamento / transformada de Laplace – domínio frequência
T	conjugado no eixo
$T_a$	torque acelerante
$T_e$	torque elétrico
$T_G$	constante de tempo do regulador
$T_m$	conjugado ou torque mecânico
$T_r$	tempo de escoamento do regulador hidráulico
$T_s$	tempo de carregamento da turbina a vapor
$T_w$	tempo de partida da inércia da água
TLB	controle de linha de interligação
u	velocidade da água na turbina hidráulica
V	volume no reaquecedor em condutores de vapor
$\dot{V}$	fasor da tensão alternada

$V_t$	tensão nos terminais da máquina
$X$	reatância
$\dot{Z}$	fasor da impedância
$W_m$	trabalho mecânico
$\alpha_m$	aceleração angular mecânico
$\delta_m$	deslocamento angular do rotor em radiano mecânico
$\delta_r$	deslocamento angular do rotor
$\Delta f$	variação de frequência
$\Delta L$	variação de carga
$\Delta \dot{m}_s$	variação do fluxo da massa de vapor
$\Delta P_{TL}$	variação da potência na linha de interligação
$\Theta_m$	deslocamento angular mecânico
$\rho$	densidade de vapor no reaquecedor / densidade específica da água
$\omega$	velocidade do rotor no motor
$\omega_m$	velocidade angular mecânica
$\omega_s$	velocidade síncrona do campo girante
$\Phi_{sr}$	fluxo magnético resultante

## Capítulo I

# INTRODUÇÃO GERAL

### 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Atualmente com o aumento da demanda de energia elétrica, torna necessária a utilização de uma ferramenta computacional que permita a avaliação de sistemas elétricos complexos de forma prática, eficiente e econômica. Assim, o *software ScicosLab* foi escolhido para modelar e simular a dinâmica e o controle da geração de sistemas elétrico de potência, constituídos por até três áreas interligadas com gerações distintas. A primeira área é composta por geração proveniente de turbina a vapor com reaquecimento e as demais por geração de origem hidráulica, por ser predominante no sistema brasileiro.

### 1.2 JUSTIFICATIVAS

A ferramenta computacional adotada é o ScicosLab, um programa até então pouco utilizado e conhecido no meio acadêmico e que atende perfeitamente a proposta em realizar a análise da dinâmica e controle automático da geração.

#### 1.2.1 O *software ScicosLab*

O *ScicosLab* é um pacote de *software* que fornece um ambiente multi-plataforma para computação científica. O seu funcionamento baseia-se no *SciLab 4.x* (BUILD4) onde inclui a modelagem e ferramenta de simulação *Scicos* e inúmeras caixas de ferramentas.

O *SciLab* (*Scientific Laboratory*) é um ambiente gráfico para cálculo científico disponível gratuitamente desde 1994 e desenvolvido em 1990 por pesquisadores do “Institut Nationale de Recherche en Informatique et en Automatique – (INRIA)” e “École Nationale des Ponts et Chaussée – (ENPC)” na França [02].

Provavelmente *Scilab* / *Scicos* é atualmente a alternativa mais completa para pacotes comerciais para modelagem de sistemas dinâmicos e de pacotes de simulação como o *MATLAB* / *Simulink* e *MATRIXx* / *SistemBuild*. É amplamente utilizada em Universidades e Escolas de Engenharia Europeia e recentemente tem ganhado campo e ambientes industriais [02].

É possível modelar e simular sistemas dinâmicos utilizando equações diferenciais e outros recursos matemáticos, de modo que estes poderiam ser tratados pelo próprio *Scilab*. No entanto, a elaboração destes equacionamentos se torna uma tarefa muito complexa e que gasta muito tempo quando feita manualmente, motivo pela qual é mais eficiente a programação, modelagem e simulação por meio de diagramas de blocos, como feito no *Scicos*.

Esta ferramenta não só trata de sistemas dinâmicos contínuos no tempo, mas também de sistemas discretos. Além disso, permite também que, a partir de modelos de sistemas criados em sua interface, o código na linguagem C seja criado, visando melhorar o desempenho das simulações ou mesmo a criação de aplicações autônomas, isto é, aquelas que não necessitam do *ScicosLab* para processar [01].

A última versão é o *ScicosLab* 4.4.1 que foi ao mercado em abril de 2011

### 1.2.2 Análise da dinâmica e controle da geração

A dinâmica do controle da geração é representada por equações diferenciais lineares que descrevem o comportamento do sistema interligado quando submetido a pequenas perturbações. As fontes geradoras são aproximadas por fontes de tensão alternada constante, enquanto que as velocidades ou frequências destas fontes são determinadas por equações de quantidade de movimento que ligam torques mecânicos (aceleradores) aos torques desaceleradores desenvolvidos tanto pelas inércias dos rotores das unidades de geração quanto pelos torques de amortecimento da carga alimentada.

Todas estas expressões são representadas na forma de diagrama de blocos para a turbina a vapor com reaquecimento e seu regulador (controle), e também para a turbina hidráulica e seu regulador (controle), utilizando-se de parâmetros típicos para cada caso.

Todas as análises da dinâmica e controle da geração são realizadas a partir de resultados gráficos que mostram as variações das duas principais grandezas de interesse: a frequência do sistema e a potência da linha de interligação. São também examinadas as influências dos ajustes realizados em outras grandezas importantes envolvidas no esquema do controle interligado, como por exemplo, o parâmetro de regulação e o fator de polarização da linha de interligação.

### **1.3 OBJETIVO GERAL**

Dentro do contexto apresentado, esse trabalho pretende demonstrar que a dinâmica da geração, o controle carga-frequência e a influência da variação de carga na potência da linha de interligação são eficientemente simulados pelo *software ScicosLab*.

Os impactos de mudanças na demanda de carga numa determinada área do sistema são investigados tendo em vista as seguintes situações: a) inclusão somente da regulação primária; b) inclusão tanto da regulação primária como também do controle suplementar.

### **1.4 ESTADO DA ARTE**

A ferramenta computacional permitirá uma avaliação da dinâmica e controle da geração de um sistema elétrico de potência de forma prática, eficiente e econômica. Para tanto, é necessário focar inicialmente cada um dos diversos componentes do sistema, com destaque para o gerador, a máquina motriz, o regulador de velocidade e a carga. Em seguida estes elementos são agrupados de forma a compor uma ou mais áreas de geração.

O modelo do gerador síncrono deve ser capaz de representar convenientemente o comportamento da máquina e também ser adequado para o projeto do seu regulador [10]

O modelo da carga deve considerar a variação com a frequência, desta forma, a carga pode ser modelada por uma parcela de potência constante e uma parcela dependente da frequência [10].

Uma turbina a vapor consiste basicamente de palhetas montadas sobre eixo, com uma aerodinâmica projetada para converter a energia térmica e de pressão do vapor superaquecido, originário da caldeira em energia mecânica. O vapor é admitido na turbina por meio de válvulas de controle a alta temperatura e pressão, e na saída da turbina ele é entregue ao condensador, a baixa pressão e temperatura [12].

Uma turbina hidráulica consiste basicamente de palhetas montadas sobre eixo, com uma aerodinâmica projetada para converter a energia potencial da água da barragem em energia mecânica. Uma central hidrelétrica é composta, basicamente, por barragem, captação e condutos de adução de água, casa de máquinas e conduto de restituição de água. Para a determinação do modelo e unidade hidráulica para o controle da velocidade, apenas a dinâmica da água no conduto forçado é considerado. Quando se leva em conta os efeitos de compressibilidade da água e elasticidade das paredes do conduto forçado, a modelagem do conduto forçado e da turbina hidráulica torna-se complexa. Neste caso faz-se necessário considerar o caráter distribuído da distribuição da tubulação hidráulica, resultando na modelagem em termos de equações de ondas viajantes de pressão e velocidade. Contudo, se o conduto forçado não for muito longo, se a água for considerada incompressível e a tubulação inelástica, é possível chegar a um modelo dinâmico mais simples para o conduto forçado e a turbina [14].

Tendo descrito as características dinâmicas de algumas máquinas motrizes e sistemas de fornecimento de energia, prossegue agora descrevendo o próximo elo da cadeia, identificado pelos controles primários de carga-frequência. Historicamente, eles formam os denominados reguladores de velocidades. Entretanto, o termo regulador implica em um sensor mecânico de velocidade conectado mecanicamente às variações de controle de potência de entrada, e, visto que, hoje a maioria dos controles de carga-frequência são eletro-hidráulicos, o termo regulador de velocidade já não descreve de maneira global esta função de controle [03].

A regulação primária é responsável pelo equilíbrio entre a carga e a geração em uma determinada área de controle. A utilização de reguladores de velocidade com queda, junto às turbinas desta área causa erros de frequência em regime permanente, quando da ocorrência de

impactos de carga de pequena amplitude, assim, a frequência do sistema estabiliza em um valor diferente da frequência anterior ao impacto. Os erros de frequência em regime permanente são agravados para os casos de impactos severos de carga as quais podem levar o sistema a operar com níveis inaceitáveis de frequência, caso seja considerada a ação exclusiva dos reguladores de velocidade. No sentido de recuperar o valor original da frequência do sistema, é utilizado um controle de característica isócrona [10] o qual é conhecido como controle secundário, controle suplementar ou controle automático de geração (CAG). Este novo componente deve fazer com que o sistema seja estável e que a frequência volte ao seu valor inicial após ocorrência de impactos (variações de cargas).

Foram investigadas várias plataformas de simulação existentes para atender os requisitos deste trabalho no que tange a análise do controle automático de geração de um sistema elétrico de potência. Como mencionado, o foco inicial seria tratar as áreas do sistema de forma individualizada, sendo diferenciada pelo tipo da máquina motriz empregada. Em seguida, a atenção seria dirigida para um sistema mais complexo formado por duas ou até três áreas interligadas. Neste contexto, a escolha convergiu para a utilização do *software* livre *ScicosLab*, desde que este programa permite a criação, edição e análise da dinâmica e o controle da geração de um sistema elétrico de potência por meio de diagramas de blocos [01]. Além da reconhecida vantagem de não demandar nenhum investimento financeiro para sua aquisição, este software também ofereceu resultados gráficos compatíveis com a qualidade e precisão daqueles obtidos com o *MatLab/Simulink* [08]

### **1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

Este trabalho apresenta-se estruturado da seguinte maneira:

#### **Capítulo II**

Permite, através de definições e conceitos básicos de movimentos rotativos, desenvolver modelagens matemáticas para gerador de energia elétrica, reguladores de velocidade e as cargas elétricas.

### **Capítulo III**

Descreve as turbinas a vapor e hidráulica, mostrando os tipos e os parâmetros empregados na representação matemática.

### **Capítulo IV**

Conhecendo os conceitos básicos dos geradores, turbinas, cargas elétricas, desenvolve o próximo elo da cadeia, o controle primário de carga-frequência ou regulador de velocidade.

A variação de cargas elétricas em áreas isoladas ou interligadas, possibilitam o desvio de frequência e variação de potência na linha de interligação, assim, o *software ScicosLab* simula os efeitos proporcionados pelo controle primário de carga-frequência.

### **Capítulo V**

Simula através do *programa ScicosLab* a atuação do controle suplementar em restabelecer a frequência para seu valor de referência, em regime permanente, quando ocorre uma alteração de carga em uma dada área.

Visualiza graficamente os resultados, de todas as combinações de Erro de Controle de Área, que contenham componentes de desvio de frequência e de variação de potência da linha de interligação, permitindo assim, a restauração final dos valores destes componentes a zero.

### **Capítulo VI**

Avalia a utilização do programa livre *ScicosLab* em modelar e simular a Dinâmica e Controle da Geração de um Sistema Elétrico de Potência, com dados reais em três áreas isoladas.

Inicialmente a três áreas são tratadas independentemente e sem utilização de nenhum tipo de controle, em seguida é feita a interligação destas sem considerar nenhuma regulação. Posteriormente, estas são submetidas ao controle primário de carga-frequência, e finalmente a última análise considera o controle suplementar.

### **Capítulo VII**

Apresenta as conclusões, destacando os pontos positivos e os resultados para atingir os objetivos deste trabalho de pesquisa.

## Capítulo II

# MODELAGEM DE SISTEMA DE POTÊNCIA

### 2.1 INTRODUÇÃO

O estudo do Controle Automático de Geração de um sistema elétrico de potência é convenientemente representado por equações diferenciais lineares que descrevem o comportamento das unidades geradoras, máquinas motrizes, cargas etc., do sistema interligado quando este é submetido a pequenas perturbações.

As unidades geradoras são aproximadas por fontes de tensão alternada constante, enquanto que as velocidades ou frequências destas unidades são determinadas por equações de quantidade de movimento que ligam os torques mecânicos (aceleradores) aos torques de inércia desenvolvidos pelos rotores das máquinas e aos torques desaceleradores produzidos pela carga alimentada.

### 2.2 CONCEITOS BÁSICOS DA MECÂNICA DE ROTAÇÃO

A análise de qualquer sistema de potência, com o objetivo de estudar sua dinâmica, envolve algumas propriedades mecânicas de rotação que abrangem as máquinas que constituem os sistemas.

As principais grandezas mecânicas serão relacionadas a seguir:

(a) - **Deslocamento angular mecânico** [ $\theta_m$ ]

É o ângulo percorrido pelo raio. Em radiano, é o arco (S) dividido pelo raio (r), isto é:

$$\theta_m = \frac{S}{r} \quad [\text{rad}] \quad (2.1)$$

**(b) - Velocidade angular mecânica [ $\omega_m$ ]**

É a relação entre a variação do ângulo ( $d\theta_m$ ) com a variação do tempo ( $dt$ ):

$$\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt} \quad \left[ \frac{\text{rad}}{\text{s}} \right] \quad (2.2)$$

**(c) - Aceleração angular mecânica [ $\alpha_m$ ]**

É a relação entre a variação da velocidade ( $d\omega$ ) com a variação do tempo ( $dt$ ):

$$\alpha_m = \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{d^2\theta_m}{dt^2} \quad \left[ \frac{\text{rad}}{\text{s}^2} \right] \quad (2.3)$$

**(d) - Conjugado ou Torque mecânico [ $T_m$ ]**

A força  $F_i$ , que atua sobre *i-ésima* partícula de massa  $m_i$  de um corpo rotativo, a qual gira em torno de um eixo que passa pelo seu centro, tem duas componentes:  $F_{ir}$  que é paralela ou tangencial ao vetor  $r$  e não tem influência sobre a rotação do corpo;  $F_{in}$  que é normal ou perpendicular ao vetor  $r$  e provoca a rotação do corpo. Esta última componente produz o conjugado mecânico expresso por:

$$T_m = \left( \sum m_i r_i^2 \right) \alpha_m = J \alpha_m \quad \left[ \text{N m ou } \frac{\text{Joule}}{\text{rad}} \right] \quad (2.4)$$

**(e) - Momento de inercia [ $J$ ]**

O somatório  $\sum m r^2$  é uma propriedade de um corpo rotativo denominada de momento de inércia ( $J$ ):

$$J = \sum m r^2 \quad \left[ \text{Kg m}^2 \quad \text{ou} \quad J \frac{\text{s}^2}{\text{rad}^2} \right] \quad (2.5)$$

**(f) - Quantidade de movimento angular (Momentum) [ $M$ ]**

Se o sistema for um corpo que gira em torno de um eixo de simetria que passa pelo centro de massa, definimos como momento angular ( $M$ ):

$$M = J \omega_m \quad [J \text{ s/rad}] \quad (2.6)$$

**(g) - Trabalho mecânico [ $W_m$ ]**

Quando a roda girante efetua um pequeno deslocamento angular  $\Delta\theta$ , a *i-ésima* partícula cobre a distância  $\Delta s_i = r_i \Delta\theta$  o trabalho da força é:

$$W_m = \int T_m d\theta_m \quad [\text{Joules ou J}] \quad (2.7)$$

(h) - **Potência mecânica [P<sub>m</sub>]**

A taxa de realização do trabalho é a potência desenvolvida pelo torque.

$$P_m = \frac{dW_m}{dt} = T_m \omega_m \quad [\text{watts ou W}] \quad (2.8)$$

(i) - **Energia cinética**

O trabalho líquido efetuado sobre um sistema é igual à variação da energia cinética do sistema. No caso de uma roda girante em torno de um eixo que passa pelo seu centro de massa é igual à soma da energia cinéticas individuais do corpo.

$$E_c = \sum \frac{1}{2} m_i v_i^2 = \frac{1}{2} \left( \sum m_i r_i^2 \right) \omega^2$$

$$E_c = \frac{1}{2} J \omega^2 \quad [J] \quad (2.9)$$

Aplicando os conceitos acima para uma unidade geradora, a energia armazenada nas massas girantes, que compreenderá o rotor, a turbina, etc., será expressa em MegaJoule ou MJ, e os ângulos em graus elétricos.

A grandeza momento de inércia (J) do movimento de rotação é análoga a massa no movimento de translação. Assim, a mesma varia enormemente com o porte do conjunto turbina-alternador. Sendo o momento de inércia (M) uma constante bastante utilizada, esta sua grande dependência com as características físicas do conjunto gerador sugere a definição de outra grandeza quase invariável com a potência da máquina, a constante de inércia (H), que definimos como a relação entre a (09) e (08):

$$H = \frac{\text{Energia Cinética Armazenada na Condição Nominal}}{\text{Potência Aparente Nominal da Máquina}}$$

$$H = \frac{E}{S} = \frac{(1/2) J \omega_m^2}{S} \left[ \frac{\text{MJ}}{\text{MVA}} \right] \text{ ou } \left[ \frac{\text{MWs}}{\text{MVA}} \right] \text{ ou [s]} \quad (2.10)$$

Se  $M$  for expresso em MJ x s / graus elétricos, então,  $\omega_m$  deverá ser também dado em graus elétricos / s, isto é:  $\omega_m = 360^\circ \cdot f$  [graus elétricos] ou seja:

$$M = \frac{S \cdot H}{180^\circ f} \quad [\text{MJ s/graus elétricos}] \quad (2.11)$$

Esta expressão permite fornecer a relação entre  $M$  e  $H$ . O valor da constante de inércia ( $H$ ) tem a grande vantagem de não variar muito com o tamanho da máquina. Por outro lado, o conhecimento do momento angular ( $M$ ) é o que mais interessa aos estudos de estabilidade transitória.

### 2.3 MODELAGEM DE GERADOR

O modelo do gerador deve ser capaz de representar convenientemente o comportamento da máquina e também ser adequado para o projeto do regulador. Desta forma para a modelagem parte-se da equação de oscilação do gerador síncrono [10].

Antes de se apresentar equação de oscilação da máquina síncrona, é importante revisar alguns conceitos básicos. Para isso, considere o gerador síncrono trifásico elementar de dois polos (polos salientes), esquematizado na Figura 2.1, onde são identificados os eixos magnéticos da máquina.

A Figura 2.2 mostra o diagrama vetorial das ondas de força magneto motriz ( $f_{mm}$ ) do rotor ( $F_r$ ), do estator ( $F_s$ ) e a resultante ( $F_{sr}$ ), de acordo com os eixos indicados na Figura 2.1. A  $f_{mm}$ ,  $F_{sr}$  (campo girante), produz o fluxo resultante ( $\Phi_{sr}$ ) o qual circula através do entreferro da máquina.

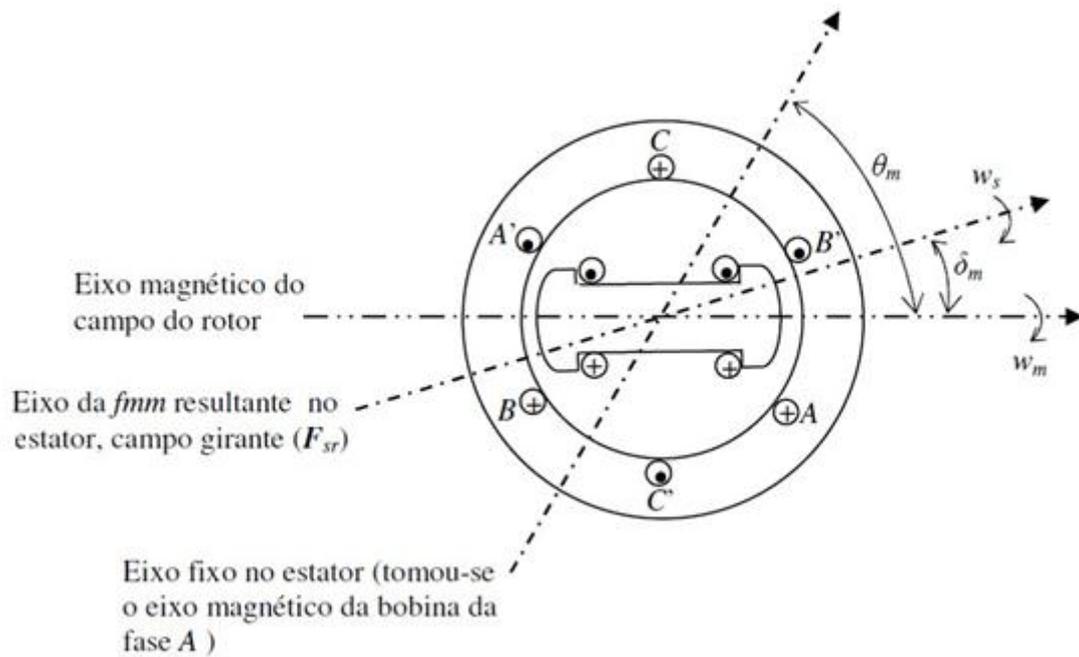


Figura 2.1 – Gerador síncrono elementar de 2 pólos

Na figura 2.2,  $\delta_r = \delta_m$  desde que,  $\delta_m$  seja dado em grau ou radiano elétrico.

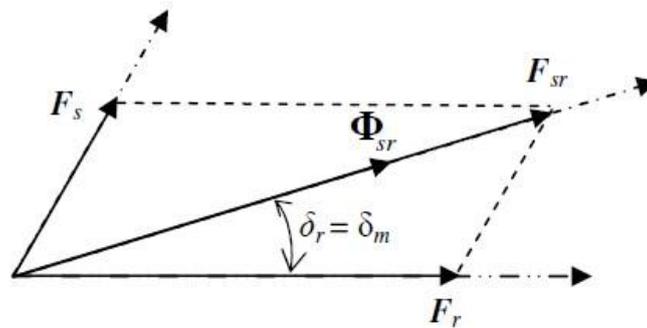


Figura 2.2 – Diagrama Vetorial das ondas de  $f_{mm}$

No funcionamento em regime permanente, as ondas de **fmm**, **F<sub>s</sub>** e **F<sub>sr</sub>** se deslocam à velocidade angular  $\omega_s = 2\pi f$  rad/s (velocidade síncrona) ao longo do estator da máquina. A frequência (**f**) é a frequência da tensão gerada (gerador) ou aplicada (motor) no enrolamento de estator da máquina.

A relação entre *ângulo elétrico* ( $\theta$ ) e *ângulo mecânico* ( $\theta_m$ ), em uma máquina síncrona de **p** polos, é mostrada na equação (2.12):

$$\theta = \frac{p}{2} \theta_m \quad [\text{rad}] \quad (2.12)$$

A onda **fmm** do rotor, **Fr**, gira à velocidade angular mecânica do rotor ( $\omega_m$ ), a qual é relacionada com a velocidade angular elétrica ( $\omega$ ) através da equação (2.13):

$$\omega_m = \frac{2}{p} \omega_s \quad \left[ \frac{\text{rad}}{\text{s}} \right] \quad (2.13)$$

Daí pode-se obter a velocidade do rotor **n** (expressa em rpm) em função da frequência **f** (em Hz) e o número de polos (**p**) da máquina, como sendo:

$$n = \frac{120 f}{p} \quad [\text{rpm}] \quad (2.14)$$

A equação de movimento do rotor de uma máquina síncrona se baseia no princípio da dinâmica, o qual estabelece que o *torque de aceleração* é igual ao *momento de inércia* do rotor multiplicado por sua *aceleração angular*.

$$J \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad [\text{N m}] \quad (2.15)$$

onde

J: Momento de inércia total da massa rotativa ( $\text{kg.m}^2$ );

$\theta_m$ : Deslocamento angular (ângulo) mecânico do rotor com relação a um eixo estacionário (referência), conforme Figura 2.1 (em radiano mecânico);

t: Tempo (em segundos);

Ta: Torque de aceleração (N m);

Tm: Torque mecânico (N m);

Te: Torque eletromagnético (N m).

O torque eletromagnético é dado por:

$$T_e = \frac{\pi}{2} \left(\frac{p}{2}\right) \Phi_{sr} F_r \text{sen}\delta_r \quad (2.16)$$

ou

$$\Phi_{sr} = \frac{V_t}{4,44 N f} \quad (2.17)$$

onde:

- $\Phi_{sr}$ : fluxo resultante;
- $V_t$ : tensão nos terminais da máquina;
- $f$ : frequência de  $V_t$ ;
- $N$ : número de espiras por fase.

Em condições normais de operação,  $T_m$  e  $T_e$  são iguais e com isso o torque acelerante  $T_a$  é nulo. Neste caso, não há aceleração ou desaceleração das massas girantes do rotor, sendo a velocidade resultante constante e igual à velocidade síncrona. Portanto, as massas rotativas do rotor e da máquina de acionamento são ditas estarem em sincronismo com as outras máquinas, operando na velocidade síncrona do sistema.

O ângulo  $\theta_m$  é medido com respeito a um eixo estacionário no estator, conforme mostrado na Figura 2.1. Ele cresce com o tempo e com a velocidade síncrona. Assim, é interessante a posição angular do rotor em relação a um eixo referência que gire à velocidade síncrona (eixo da fmm resultante no estator). Dessa forma, define-se:

$$\theta_m = \omega_s t + \delta_m \quad (2.18)$$

onde:

$\delta_m$ : é o deslocamento angular do rotor em relação ao eixo girante, em radiano mecânico derivando (2.18) em relação a  $t$ , obtém-se:

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \omega_s + \frac{d\delta_m}{dt} \quad (2.19)$$

$$\omega_m = \omega_s + \frac{d\delta_m}{dt} \quad (2.20)$$

$$\frac{d^2\theta_m}{dt^2} = \frac{d^2\delta_m}{dt^2} \quad (2.21)$$

A equação (2.19) mostra que a velocidade mecânica do rotor  $\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt}$  é constante e igual a aceleração síncrona, quando  $\frac{d\delta_m}{dt} = 0$ . A equação (2.20) representa a aceleração angular do rotor.

A substituição de (2.21) em (2.15), resulta na equação (2.22):

$$J \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad (2.22)$$

Multiplicando o primeiro membro e o segundo membro por  $\omega_m$ , temos:

$$J \omega_m \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = \omega_m T_a = \omega_m T_m - \omega_m T_e \quad (2.23)$$

O coeficiente  $J \omega_m$  é o momento angular do rotor ( $\text{kg.m}^2/\text{s}$ ). Na velocidade síncrona, é chamado de “constante” de inércia da máquina, sendo simbolizado por  $M$ .

Em algumas condições de operação,  $M$  não é constante, tendo em vista que  $\omega_m$  não é igual à  $\omega_s$ .

Porém, na prática,  $\omega_m$  não difere significativamente de  $\omega_s$  quando a máquina é estável. Reescrevendo (23) em termos de  $M$ , tem-se equação (2.24):

$$M \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad [\text{W}] \quad (2.24)$$

Nos dados de máquina para estudo de estabilidade, outra constante relacionada à inércia, comumente fornecida pelos fabricantes, é a constante  $H$ . É definida na equação (2.25):

$$H = \frac{\text{Energia cinética na velocidade síncrona, em mega joule}}{\text{Potência trifásica da máquina em MVA}} \quad \left[ \frac{\text{MJ}}{\text{MVA}} \right]$$

ou

$$H = \frac{\frac{1}{2} J \omega_s^2}{S_{maq}} = \frac{\frac{1}{2} M \omega_s}{S_{maq}} \quad \left[ \frac{\text{MJ}}{\text{MVA}} \right] \quad (2.25)$$

Explicitando M em (2.25) e substituindo em (2.24), obtém-se a equação (2.26):

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = \frac{P_a}{S_{maq}} = \frac{P_m - P_e}{S_{maq}} \quad (2.26)$$

Tomando como potência base a potência nominal da própria máquina, tem-se (2.26) em p.u na base da máquina.

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad [\text{p.u}] \quad (2.27)$$

A equação (2.27) é chamada de equação de oscilação da máquina, a qual governa a dinâmica rotacional das máquinas síncronas nos estudos de estabilidade.

Escrevendo (2.27) em termos de f (Hz) e fazendo  $\delta_m = \delta$  (radiano elétrico), tem-se a equação (2.28):

$$\frac{2H}{2\pi f} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad [\text{p.u}] \quad (2.28)$$

Para o caso do ângulo  $\delta$  ser dado em grau elétrico, resulta a equação(2.29):

$$\frac{H}{180 f} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad [\text{p.u}] \quad (2.29)$$

A equação (2.24) pode ser reescrita como

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d}{dt} \left( \frac{d\delta_m}{dt} \right) = P_a = P_m - P_e \quad [\text{p.u}] \quad (2.30)$$

$$2H \frac{d}{dt} \left( \frac{d\delta_m/dt}{\omega_s} \right) = P_a = P_m - P_e \quad [\text{p.u}] \quad (2.31)$$

considerando  $\frac{d\delta_m/dt}{\omega_s} = p\delta$  como **variação** (desvio) da velocidade em p. u.

substituindo, na equação (2.31) obtém-se a equação (2.32):

$$2H \frac{d}{dt}(p\delta) = \Delta P_a = \Delta P_m - \Delta P_e \text{ [p.u]} \quad (2.32)$$

Definindo  $2H = M$ , sendo que  $M$  passa a ser expresso agora em segundos, então a equação (2.32) passa a ser a equação (2.33):

$$M \frac{d}{dt}(p\delta) = \Delta P_a = \Delta P_m - \Delta P_e \text{ [p.u]} \quad (2.33)$$

Aplicando a Transformada de Laplace, na equação (2.33), o que permite passar do domínio do tempo para o domínio da frequência o que possibilitará o desenvolvimento do diagrama de bloco do gerador (figura 2.3) .

$$M_{(s)} s p\delta = \Delta P_{m(s)} - P_{e(s)}$$

$$\frac{p\delta}{\Delta P_{m(s)} - P_{e(s)}} = \frac{1}{M_{(s)} s} \quad (2.34)$$

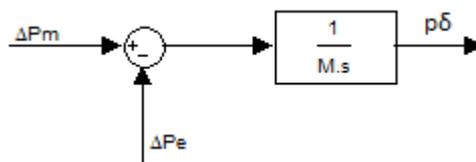


Figura 2.3 - Diagrama de bloco do gerador

## 2.4 MODELAGEM DE CARGA

A carga de um sistema elétrico influencia decisivamente nos resultados e conclusões de um estudo de Controle Carga-Frequência devido ao amortecimento que esta introduz nas oscilações de potência e frequência subsequentes a uma perturbação no sistema elétrico. A

maioria das cargas recai em dois principais modelos: (a) Impedância constante, (b) Motores de indução. Estes são abordados separadamente a seguir [03].

### 2.4.1 Cargas tipo impedância constante

Dentre as várias cargas que podem ser enquadradas como impedância constante, podem-se exemplificar as seguintes:

- Caldeiras elétricas,
- Sistemas de retificação CA/CC,
- Fornos a arco,
- Eletrólise,
- Tração elétrica,
- Iluminação por lâmpadas incandescentes,
- Iluminação por lâmpadas de descarga.

A potência ativa e reativa das cargas tipo impedância constante podem ser obtidas a partir das equações (2.35) a (2.37), mostradas a seguir:

$$\dot{V} = \dot{Z} \dot{I} \quad (2.35)$$

$$\dot{Z} = R + jX \quad (2.36)$$

$$\dot{S} = P + jQ = \dot{V} \dot{I}^* \quad (2.37)$$

Substitui-se, inicialmente (2.35) e (2.36) em (2.37), e, logo após realizar as operações necessárias para isolar as partes ativa e reativa da potência aparente ( $\dot{S}$ ), obtém-se as equações (2.38) e (2.39):

$$P + jQ = \dot{V} \frac{V^*}{Z^*} = \frac{V^2}{R - jX} \quad (2.38)$$

Multiplicando e dividindo a equação (2.38) pelo conjugado, obtém-se a equação (2.39):

$$P + jQ = \frac{V^2}{R - jX} \frac{(R + jX)}{(R + jX)}$$

$$P + jQ = \frac{R V^2}{R^2 + X^2} + j \frac{X V^2}{R^2 + X^2} \quad (2.39)$$

Separando a parte ativa e a reativa, tem-se as equações (2.40) e (2.41), respectivamente:

$$P = \frac{R V^2}{R^2 + X^2} = \frac{R V^2}{R^2 + (2 \pi f L)^2} = \frac{k_P}{f^2} = k_P f^{-2} \quad (2.40)$$

$$Q = \frac{X V^2}{R^2 + X^2} = \frac{(2 \pi f L) V^2}{R^2 + (2 \pi f L)^2} \cong \frac{k_Q}{f} = k_Q f^{-1} \quad (2.41)$$

Logo, em cargas do tipo impedância constante, a potência ativa varia inversamente proporcional ao quadrado da frequência, enquanto que a potência reativa varia inversamente proporcional à frequência. Portanto, para estas cargas, a potência ativa é mais sensível à variação de frequência do que a potência reativa. As expressões (2.40) e (2.41) obtidas originam as curvas características  $P - f$  e  $Q - f$  para as cargas de impedância constante mostrada nas figuras 2.4

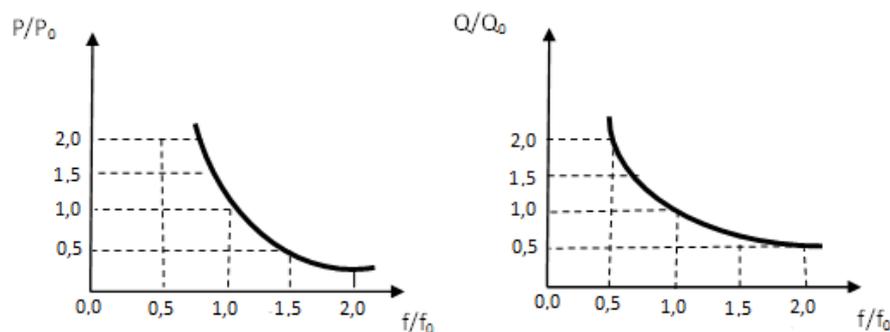


Figura 2.4– Características das cargas de impedância constante em função da frequência

No entorno da frequência nominal ( $f_0$ ), tem-se:

Para a Potência Ativa

$$\frac{dP}{df} = -2 k f^{-3} = \frac{-2 k f^{-2}}{f} = \frac{-2 P}{f}$$

$$\frac{dP}{df} = \frac{-2 P}{f} \Rightarrow \frac{\Delta P/P}{\Delta f/f} = -2$$

$$\frac{\Delta P\%}{\Delta f\%} = -2 \quad (2.42)$$

Para a Potência Reativa:

$$\frac{dQ}{df} = -1 k f^{-2} = \frac{-k f^{-1}}{f} = \frac{-Q}{f}$$

$$\frac{dQ}{df} = \frac{-Q}{f} \Rightarrow \frac{\Delta Q/Q}{\Delta f/f} = -1$$

$$\frac{\Delta Q\%}{\Delta f\%} = -1 \quad (2.43)$$

### 2.4.2 Cargas tipo Motores de Indução

Para análise de cargas com este tipo de representação, deve-se partir do circuito equivalente simplificado de um motor de indução (MI), mostrado na figura 2.5.

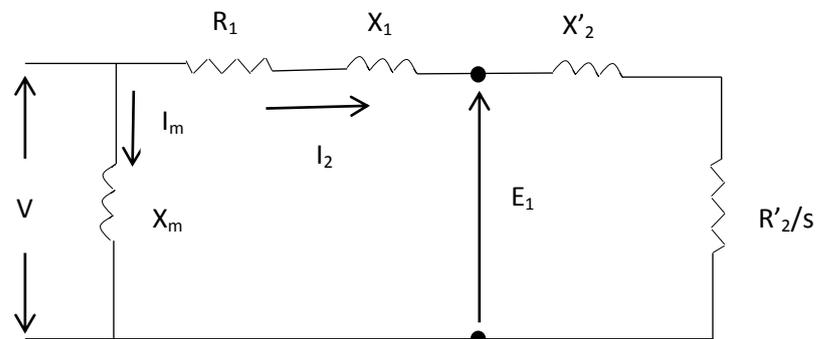


Figura 2.5 - Circuito elétrico equivalente de um motor de indução (Todas as grandezas do rotor estão referidas ao estator)

Durante a análise é adotada a seguinte notação:

s - escorregamento

$\omega_s$  - velocidade síncrona do campo girante

$\omega$  - velocidade do rotor do motor =  $(1-s) \omega_s$

T - conjugado no eixo

$P_{mec}$  - Potência mecânica no eixo

$P_{12}$  - Potência elétrica transferida do eixo do estator ao rotor

Inicialmente será analisada a potência ativa absorvida pelo motor. Da teoria do motor de indução, pode-se escrever:

$$\omega = (1 - s)\omega_s \quad (2.44)$$

$$P_{mec} = (1 - s)P_{12} \quad (2.45)$$

$$T = \frac{P_{mec}}{\omega} = \frac{(1 - s)P_{12}}{(1 - s)\omega_s} = \frac{P_{12}}{\omega_s} \quad (2.46)$$

Desprezando a potência dissipada nos enrolamentos do estator, pode-se afirmar pela última expressão que o comportamento do motor é diretamente dependente da potência elétrica transferida do estator ao rotor sendo esta empregada para desenvolver o conjugado no eixo.

A equação para a tensão induzida (por fase) no estator ( $E_1$ ) em função do número de espiras por fase (N), da frequência (f) e do fluxo mútuo ( $\Phi_m$ ), como sendo:

$$E_1 = 4,44 N f \Phi_m 10^{-8} \cong k f \quad (2.47)$$

A corrente do rotor (referida ao estator) pode ser obtida a partir do circuito equivalente do motor de indução mostrado na figura 2.5 como:

$$I_2 = \frac{s E_1}{\sqrt{(R'_2)^2 + (s X'_2)^2}} = \frac{s k f}{\sqrt{(R'_2)^2 + (s X'_2)^2}} \quad (2.48)$$

A potência elétrica transferida do estator ao rotor pode também ser obtida a partir do circuito equivalente do motor (figura 2.5), sendo expressa por:

$$P_{12} = I_2^2 \frac{R'_2}{s} \quad (2.49)$$

Substituindo  $I_2$  na expressão de  $P_{12}$ :

$$P_{12} = \frac{s^2 k^2 f^2}{(R'_2)^2 + (s X'_2)^2} \frac{R'_2}{s} \quad (2.50)$$

Então, desprezando a potência dissipada nos enrolamentos do estator, pode-se concluir que a potência absorvida ( $P$ ) é função do escorregamento e do quadrado da frequência [15]. Assim, pode-se escrever:

$$P = k_1 s f^2 \quad (2.51)$$

### 2.4.3 Amortecimento da carga do Sistema

Em geral as cargas de um sistema de potência são uma composição de cargas com varias características de velocidade-torque, cargas de iluminação e de aquecimento. Alterações de frequência afetam a carga devido a mudanças nas velocidades dos motores, bem como mudanças na tensão, nos pontos de utilização, consequências causadas pela frequência [13].

A figura 2.6 mostra o diagrama de blocos do sistema de potência contendo uma máquina isolada equivalente e uma carga  $\Delta L$  conectada com uma característica de amortecimento  $D$

Em geral, pode-se supor (para simplificar a modelagem) que a carga varia linearmente com a frequência ( $D$  constante) para cargas industriais, para carga resistiva  $D = 0$ .

$D$  = coeficiente de amortecimento (variação da carga com a frequência)

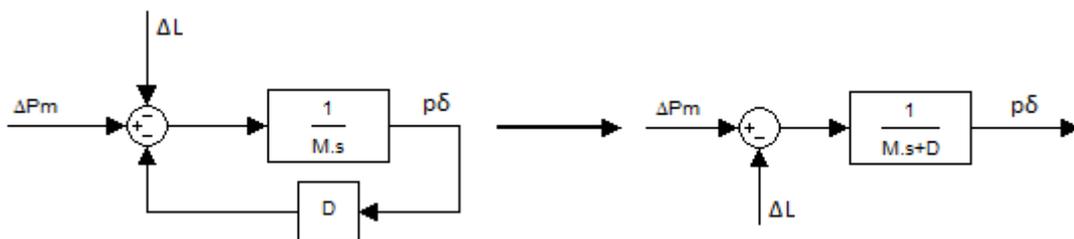


Figura 2.6 – Diagrama de blocos do conjunto Gerador – Carga (carga conectada com característica de amortecimento  $D$ )

A figura 2.6 mostra o diagrama de blocos relativo à função transferência da equação (2.52):

$$\frac{p\delta}{\Delta P_m - \Delta L} = \frac{1}{M s + D} \quad (2.52)$$

Por meio da equação 2.52 é possível verificar a variação da velocidade da máquina (frequência) em função de uma variação em degrau da carga conectada ao gerador.

## 2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os conceitos e definições representados por equações matemáticas foram utilizados para descrever o comportamento das unidades geradoras bem como da carga do sistema elétrico de potência.

A modelagem do gerador é apresentada de forma adequada, possibilitando mostrar a interferência do regulador tanto no gerador com turbina à vapor como naquele com a turbina hidráulica.

A formatação da modelagem do gerador é obtida com a aplicação do Teorema de Laplace ou seja:

$$\frac{p\delta}{\Delta P_{m(s)} - P_{e(s)}} = \frac{1}{M(s)}$$

Quanto à modelagem de carga, esta possibilita o estudo do Controle de Carga-Frequência, subsequentes a uma perturbação no sistema elétrico, obtida através do estudo do amortecimento da carga, ou seja:

$$\frac{p\delta}{\Delta P_m - \Delta L} = \frac{1}{M s + D}$$

Os diagramas de blocos representando o Gerador acrescido do amortecimento de forma simplificada permitirá a simulação utilizando o programa *ScicosLab*, pois este trabalho visa a atuação do programa nas simulações.

As unidades geradoras representadas pelas turbinas a vapor e hidráulicas serão focadas no próximo capítulo.

## Capítulo III

# MÁQUINAS MOTRIZES E SISTEMAS DE FORNECIMENTO DE ENERGIA

### 3.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são abordados os principais tipos de máquinas motrizes empregadas em sistemas de geração de grande porte: as turbinas a vapor e as turbinas hidráulicas. Para cada máquina motriz será estudada a sua resposta dinâmica ou potência de saída a partir de uma variação na entrada a qual corresponde, respectivamente, na posição da válvula de vapor ou das palhetas diretoras ou distribuidor de água. Deve-se ressaltar que tais máquinas primárias serão representadas por meio de diagramas de blocos e funções de transferência que são válidos apenas para pequenas variações em torno do ponto de equilíbrio.

### 3.2 TURBINAS A VAPOR

Uma turbina a vapor consiste basicamente de palhetas montadas sobre eixo, com uma aerodinâmica projetada para converter a energia térmica e de pressão do vapor superaquecido, originário da caldeira, em energia mecânica. O vapor é admitido na turbina por meio de válvulas de controle de alta temperatura e pressão, e na saída da turbina ele é entregue ao condensador, a baixa pressão e temperatura. Em geral as turbinas são compostas de diferentes estágios, em função do nível de pressão de vapor.

A fonte de calor para a caldeira que supre o vapor pode ser um reator nuclear ou um forno à combustível fóssil (carvão, óleo ou gás) ou biomassa. Um esquema típico de uma turbina a vapor sem reaquecimento é mostrado na figura 3.1e a turbina a vapor com reaquecimento é mostrada na figura 3.1 [03].

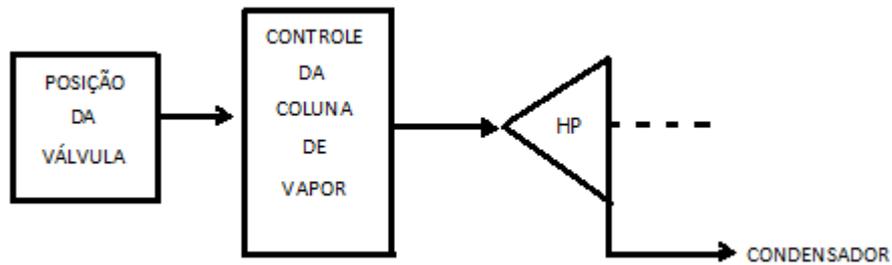


Figura 3.1 - Arranjo esquemático de uma turbina a vapor sem reaquecimento

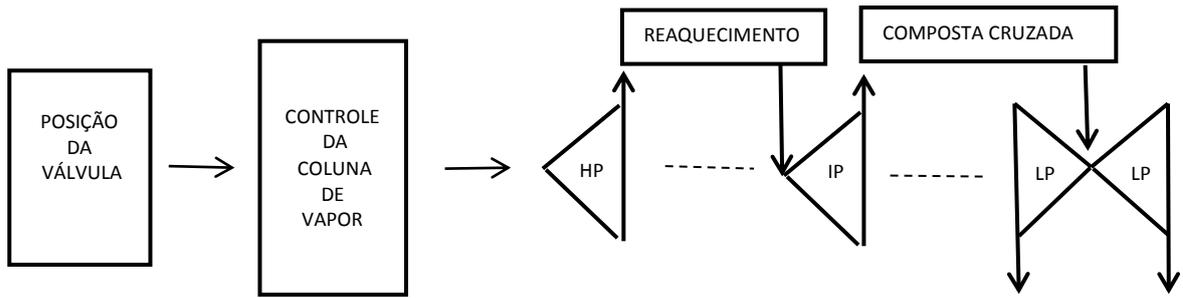
Estas turbinas consistem geralmente de dois ou mais seções de turbina (estágios), chamados cilindros, acoplados em série e operando em várias pressões e temperaturas diferentes.

Nas turbinas a vapor com reaquecimento os cilindros são conectados por tubulações apropriadas, e, em muitos conjuntos, o vapor é reaquecido na caldeira entre dois cilindros de pressões alta e intermediária (“reheater”).

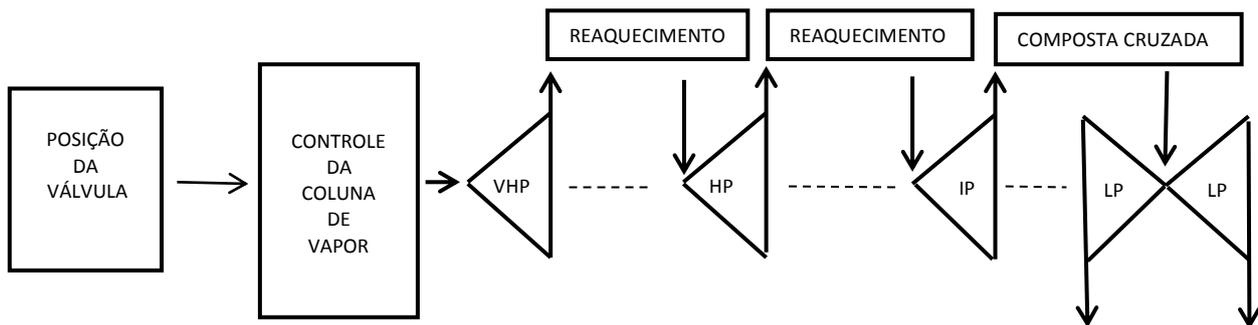
A turbina pode ser composta enfileirada (“tandem compound”) – figura 3.2(a) ou figura 3.2(b) e a figura 3.2(c) – composta cruzada (“cross compound”).

Em uma unidade composta *tandem* todas as seções estão no mesmo eixo com um único gerador, enquanto que uma unidade composta cruzada consiste de dois eixos sendo cada um deles conectado a um gerador. A unidade com combinação cruzada é operada como uma unidade única com um conjunto de controles.

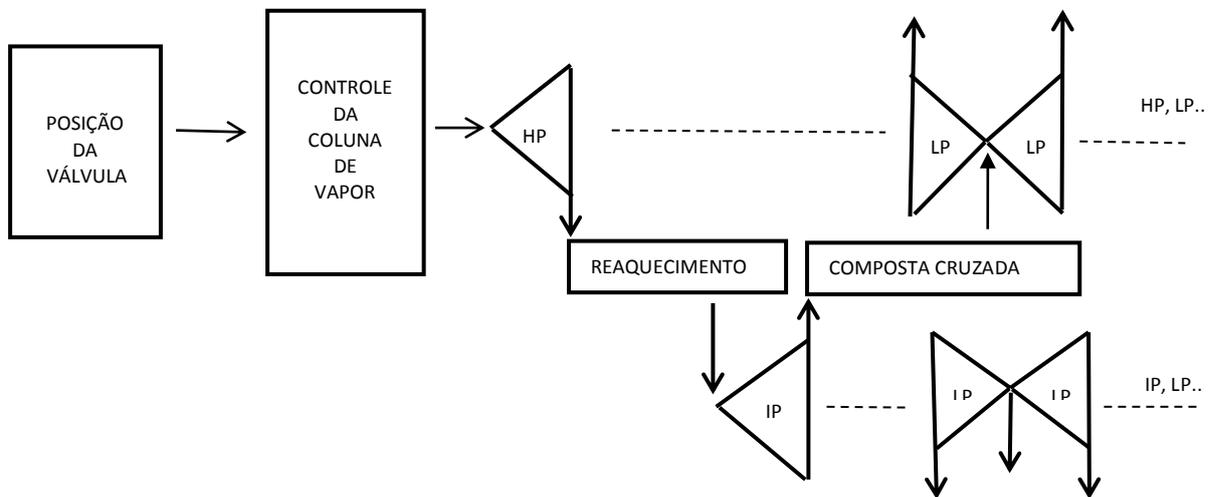
A maioria das unidades modernas é do tipo composta enfileirada (“tandem compound”), que favorecem custos mais baixos, ainda que as unidades de combinação cruzada sejam mais eficientes e possuam capacidades mais elevadas.



(a) Turbina a vapor composta enfileirada com reaquecimento simples



(b) Turbina a vapor composta enfileirada com reaquecimento duplo



(c) Turbina a vapor composta cruzada com reaquecimento simples

Figura 3.2 – Configurações típicas de uma turbina a vapor com reaquecimento

### 3.2.1 Modelos de turbinas a vapor

A saída de potência da turbina é controlada pela posição das Válvulas de Controle que controlam o fluxo de vapor para as turbinas. O vapor flui através dos cilindros, reaquecedor e tubulações com velocidade finita. Em diagramas de blocos isto é equivalente a incluir atrasos de tempo no sistema [03].

O componente de uma turbina a vapor que apresenta maior constante de tempo é o reaquecedor. Para grandes conjuntos, o reaquecedor pode reter vapor correspondente a vários segundos de potência plena do gerador. As implicações para o sistema de controle são de tornar obviamente bastante difícil conseguir uma resposta rápida com esta quantidade de energia armazenada.

O atraso entre as diferentes partes do caminho do vapor normalmente é modelado por um filtro de primeira ordem. Certas frações da potência total são extraídas de diferentes turbinas e isto é modelado através de fatores ou ganhos nos modelos.

A potência desenvolvida em uma turbina é proporcional ao fluxo de vapor, sendo expressa por:

$$P_m \propto \dot{m}(h_i - h_o) \quad (3.1)$$

onde:

$P_m$  = Potência da máquina motriz;

$h_i$  = Entalpia do vapor de entrada;

$h_o$  = Entalpia do vapor de saída;

$\dot{m}$  = Fluxo de massa de vapor.

Visto que  $h_i$  e  $h_o$  são em geral quase constantes, a resposta de  $P_m$  segue a do fluxo de vapor. Em turbinas sem reaquecimento, a resposta do fluxo de vapor a uma variação na válvula reguladora da turbina é quase instantânea, isto é, apresenta uma constante de tempo de 0,2 a 0,3 segundo, devido ao pequeno tempo de carregamento do volume da turbina.

Supondo que a pressão do vapor de suprimento permaneça essencialmente constante, então, a resposta da potência da turbina a uma alteração da posição da válvula pode ser descrita pela função de transferência da figura 3.3, para o caso de turbina sem reaquecimento.

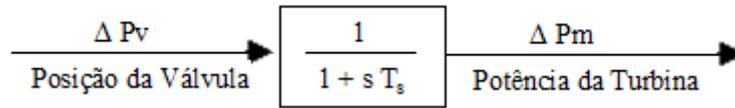


Figura 3.3 – Função de transferência para turbina a vapor sem reaquecimento

(Nota:  $T_s = 0,2$  a  $0,3$  s = constante de tempo do gerador de vapor)

Os fenômenos fluxo/pressão, que dão origem a esta constante de tempo, são similares aos desenvolvidos para o reaquecedor nas páginas seguintes. A figura 3.4 mostra um esquema de turbina a vapor com reaquecedor.

Embora a variação no fluxo na turbina de alta pressão se estabeleça com uma pequena constante de tempo, como na figura 3.3, o fluxo na turbina de baixa pressão só pode variar com o desenvolvimento de pressão do volume de reaquecedor.

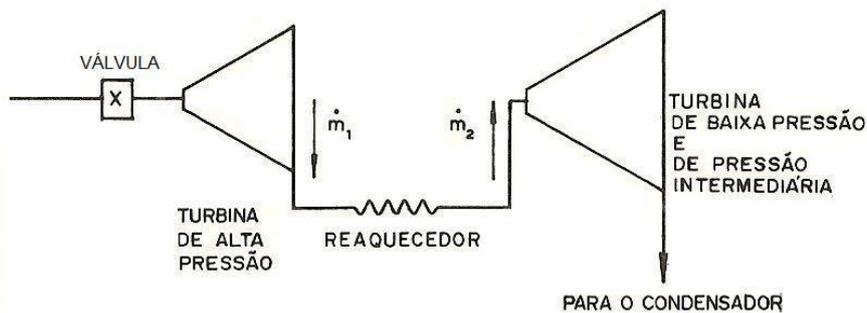


Figura 3.4 – Esquema de funcionamento de uma turbina a vapor com reaquecimento

As equações seguintes descrevem aproximadamente os fenômenos do fluxo transitório de vapor para dentro do reaquecedor e para dentro do estágio da turbina a jusante do reaquecedor, sendo utilizada a seguinte notação:

$\dot{m}_1$  = fluxo de massa de vapor entrando no reaquecedor, em libras/segundo;

$\dot{m}_2$  = fluxo de massa de vapor saindo do reaquecedor e entrando na turbina de baixa pressão, em libras/segundo;

$\dot{m}_0$  = fluxo de massa de vapor nominal, em libras/segundo;

$P$  = pressão do reaquecedor, em psi;

$\rho$  = densidade do vapor do reaquecedor, em libras-pés cúbicos (valor médio);

$V$  = volume do reaquecedor e condutores de vapor, em pés-cúbicos;

$P_{R0}$  = pressão nominal do reaquecedor, em psi;

Equação da continuidade (3.2):

$$V \frac{d\rho}{dt} = \dot{m}_1 - \dot{m}_2 \quad (3.2)$$

Equação de fluxo (fluxo proporcional à pressão)(3.3):

$$\dot{m}_2 = \frac{\dot{m}_0}{P_{R0}} P \quad (3.3)$$

tem-se que:

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{dP}{dt} \frac{\partial \rho}{\partial P} \quad (3.4)$$

onde

$\left. \frac{\partial \rho}{\partial P} \right|_T$  = variação na densidade de vapor devida à pressão, sendo determinada a partir

das tabelas de vapor

Substituindo a equação (3.3) e (3.4) na equação (3.2) e tomando a transformada de Laplace da equação resultante (desprezando as condições iniciais), obtém-se a equação (3.5):

$$sV \left. \frac{\partial \rho}{\partial P} \right|_T \frac{P_{R0}}{\dot{m}_0} \dot{m}_2(s) = \dot{m}_1(s) - \dot{m}_2(s) \quad (3.5)$$

$$\dot{m}_2(s) = \frac{\dot{m}_1(s)}{\left( 1 + V \left. \frac{\partial \rho}{\partial P} \right|_T \frac{P_{R0}}{\dot{m}_0} s \right)}$$

$$\dot{m}_2(s) = \frac{\dot{m}_1(s)}{1 + T_R s} \quad (3.6)$$

onde

$$T_R = V \left. \frac{\partial \rho}{\partial P} \right|_T \frac{P_{R0}}{\dot{m}_0} = \text{constante de tempo do reaquecedor}$$

**Nota:** Uma unidade típica de 300 MW com  $P_{R0} = 600$  psi  $\left. \frac{\partial \rho}{\partial P} \right|_T = 0,0015$ ;  $\dot{m}_0 = 500$  lb/s e  $V = 3000$  pés-cúbicos, conduz a  $T_R = 5,4$  segundos. Valores de  $T_R$  estão entre 5 e 7 segundos.

A função de transferência global da máquina motriz para uma turbina de reaquecimento é obtida somando-se as potências desenvolvidas pelos estágios da turbina a montante e a jusante do reaquecedor. Se  $c$  é a proporção da potência desenvolvida pela turbina de alta pressão (cerca de 0,3 próximo de plena carga), então a função de transferência para a potência total é:

$$\frac{\Delta P_m}{\Delta P_V} = \frac{c}{1 + T_s s} + \frac{1 - c}{(1 + T_s s)(1 + T_R s)}$$

$$\frac{\Delta P_m}{\Delta P_V} = \frac{1 + c T_R s}{(1 + T_s s)(1 + T_R s)} \quad (3.7)$$

A figura 3.5 mostra a resposta da potência de uma turbina com reaquecimento para uma variação em degrau na posição da válvula de controle.

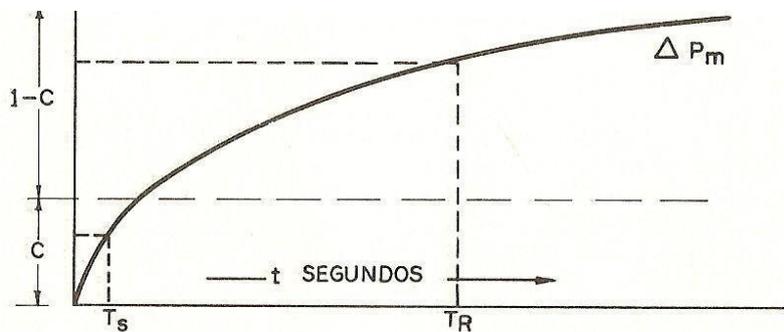


Figura 3.5 – Resposta da potência de uma turbina com reaquecimento para uma variação em degrau na posição da válvula de controle

Deve-se notar que na análise acima foram desprezados certos efeitos de segunda ordem. Por exemplo, a hipótese de que o fluxo da turbina de alta pressão é diretamente proporcional à pressão de admissão e à abertura da válvula é válida para regime de fluxo crítico, onde a relação da pressão a jusante e a montante é menor que 0,5. Sob este regime, não há essencialmente efeitos de realimentação da pressão do reaquecedor sobre o fluxo através da turbina e alta pressão.

Próximo a plena carga, o regime não é bastante crítico e, na realidade, sente-se um leve efeito entre a pressão do reaquecedor e o fluxo principal de vapor. Um outro efeito de segunda ordem é o carregamento transitório dos aquecedores de água de alimentação que afetam os fluxos de extração da turbina, com efeitos correspondentes na sua potência.

Embora tais efeitos sejam considerados em análises dinâmicas detalhadas de turbinas, como poderia ser necessário nos estudos de projeto de controle de velocidade, eles podem ser desprezados, por serem de segunda ordem, para os estudos de comportamento do sistema geral, relacionados com pequenas variações em torno de um ponto de operação.

Um efeito mais importante na resposta da turbina é o comportamento da pressão da caldeira sob a ação da variação da demanda de vapor e dos efeitos dos controles da caldeira [03].

#### **3.2.2 Efeitos de caldeiras na turbina a vapor**

Visto que o sistema de fornecimento de vapor não é uma fonte infinita, a pressão da caldeira varia transitoriamente com variações na demanda de vapor. A dinâmica da caldeira é um assunto muito complexo, exigindo a consideração de muitos efeitos termodinâmicos simultâneos. Entretanto, no interesse desta discussão, pode-se olhar o processo da caldeira de uma forma bastante simplificada, conforme mostrada nas figuras 3.6 e 3.7.

A pressão da caldeira é afetada por variações na massa de vapor dentro do seu volume de armazenamento. Estas alterações na massa armazenada resultam de desequilíbrios transitórios entre o fluxo de vapor que entra na turbina e a geração de vapor na caldeira. A pressão na válvula de controle difere da pressão da caldeira pela queda de pressão nos superaquecedores. Esta queda de pressão é aproximadamente proporcional ao quadrado do fluxo de vapor.

Um circuito elétrico equivalente, que se comporta de forma análoga aos fenômenos de pressão de caldeira para pequenas variações de carga, é mostrado na figura 3.7, onde  $I_1$  é análogo à geração de vapor,  $I_2$  ao fluxo de vapor para a turbina,  $R$  a resistência de atrito apresentada pelos superaquecedores e  $R_T$  à resistência oferecida pela turbina a uma dada abertura da válvula.

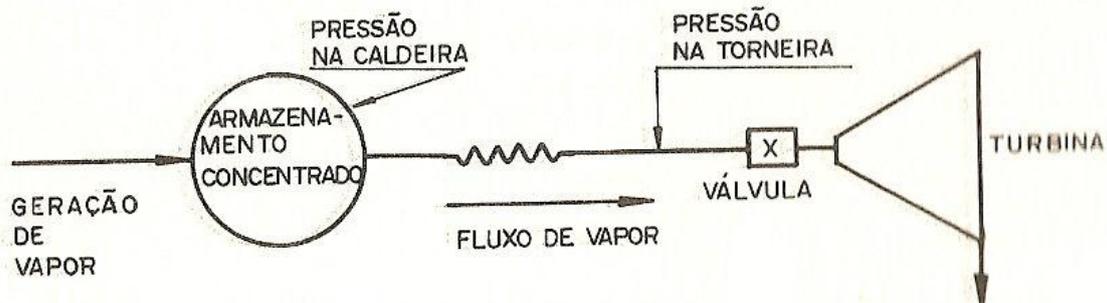


Figura 3.6 – Esquema do sistema da turbina-caldeira

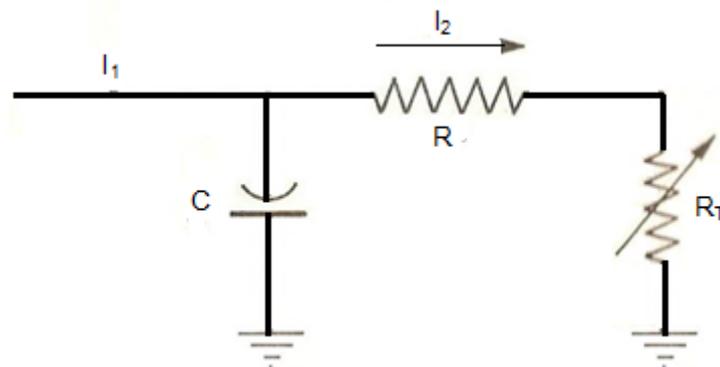


Figura 3.7 – Simulação elétrica do fenômeno de fluxo de pressão da caldeira

A tensão através do capacitor é análoga à pressão da caldeira, e a tensão através de  $R_T$  é análoga à pressão na válvula de controle  $P_T$ . Na representação equivalente, anteriormente mostrada, uma variação na válvula da turbina é representada por uma variação em  $R_T$ .

Para os primeiros segundos que se seguem a uma variação em  $R_T$  ou válvula da turbina, a tensão através do capacitor (pressão da caldeira) não se altera. Entretanto, a pressão na válvula de controle sofrerá um desvio devido à variação na queda de atrito ( $\Delta I_2 R$ ) nos superaquecedores e tubulações.

Visto que a queda de pressão é proporcional ao quadrado do fluxo, ao passo que a queda de tensão é linearmente relacionada à corrente, a analogia acima é aproximada e vale

para pequenas alterações em torno de um ponto de operação. O valor da resistência  $R$  varia com o nível de carga de operação, como pode ser visto a seguir:

Queda de pressão da caldeira para válvula de controle:

$$P_{DT} = K \dot{m}_S^2 \quad (3.8)$$

onde:

$K$  = coeficiente de atrito;

$\dot{m}_S$  = fluxo de vapor.

Desenvolvimento a partir da equação (3.8) na variação da queda de pressão na caldeira, através da válvula de controle (pequenas perturbações) :

$$P_{DT_0} = K \dot{m}_{S_0}^2 \text{ (condição inicial)}$$

$$P_{DT_0} + \Delta P_{DT} = K (\dot{m}_{S_0} + \Delta \dot{m}_S)^2$$

$$P_{DT_0} + \Delta P_{DT} = K (\dot{m}_{S_0}^2 + 2 \dot{m}_{S_0} \Delta \dot{m}_S + \Delta \dot{m}_S^2)$$

$$\Delta \dot{m}_S^2 \cong 0$$

$$P_{DT_0} + \Delta P_{DT} = K \dot{m}_{S_0}^2 + 2 K \dot{m}_{S_0} \Delta \dot{m}_S$$

$$P_{DT_0} + \Delta P_{DT} = P_{DT_0} + 2 K \dot{m}_{S_0} \Delta \dot{m}_S$$

$$\Delta P_{DT} = 2 K \dot{m}_{S_0} \Delta \dot{m}_S \quad (3.9)$$

onde:

$\dot{m}_{S_0}$  = fluxo de vapor de regime permanente no ponto de operação particular,

$\Delta \dot{m}_S$  = variação do fluxo de vapor.

**Nota:** No análogo da figura 3.7, tem-se que  $R = 2 K \dot{m}_{S_0}$ .

### 3.2.3 Modelo representativo do processo de caldeira

O efeito das variações na válvula da turbina pode ser representado na forma linearizada de pequenas perturbações, conforme segue:

$$\dot{m}_S = K_V P_T \quad (3.10)$$

onde:

$K_V$  = coeficiente proporcional à abertura da válvula.

mas, na condição inicial, temos:

$$\dot{m}_{S_0} = K_{V_0} P_{T_0}$$

$$\dot{m}_{S_0} + \Delta \dot{m}_S = (K_{V_0} \Delta K_V) (P_{T_0} + \Delta P_T)$$

$$\dot{m}_{S_0} + \Delta \dot{m}_S = K_{V_0} P_{T_0} + K_{V_0} \Delta P_T + P_{T_0} \Delta K_V + \Delta K_V$$

$$\dot{m}_{S_0} + \Delta \dot{m}_S = \dot{m}_{S_0} + K_{V_0} \Delta P_T + P_{T_0} \Delta K_V + 0$$

$$\Delta \dot{m}_S = K_{V_0} \Delta P_T + P_{T_0} \Delta K_V$$

Para pequenas perturbações, desprezando termos de segunda ordem, tem-se:

$$\Delta \dot{m}_S = K_{V_0} \Delta P_T + \frac{\dot{m}_{S_0}}{K_{V_0}} \Delta K_V \quad (3.11)$$

A geração de vapor ( $I_1$ ) é proporcional à liberação de calor da fornalha, e segue com uma pequena constante de tempo (5 a 7 segundos), devido ao coeficiente de transmissão de calor entre a parede do tubo e a película de água. O processo pode, portanto, ser representado pelo diagrama de blocos da figura 3.7, onde o subscrito “0” indica o valor de regime permanente e o prefixo “ $\Delta$ ” indica a variação em torno do valor de regime permanente.

Na figura 3.8 tem-se a seguinte notação:

$\dot{m}_W$  = geração de vapor

$\dot{m}_S$  = fluxo de vapor

$P_D$  = pressão da caldeira

$P_T$  = pressão da válvula de controle;

$T_w$  = constante de tempo da película de água;

$K_V$  = coeficiente proporcional à abertura da válvula (ou proporcional à carga);

$C_b$  = constante de tempo do armazenamento da caldeira.

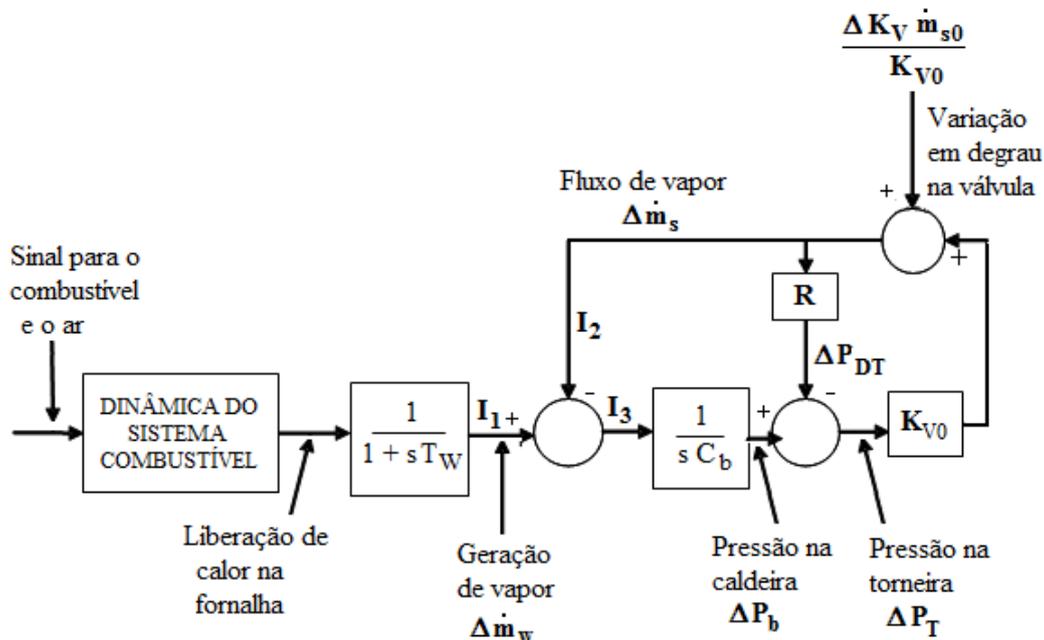


Figura 3.8 – Diagrama de blocos simplificado do processo da caldeira

Nesse modelo linear de pequenas variações, os parâmetros que se alteram com o nível de carga são:  $R$  e  $K_{V0}$ . Todos os outros parâmetros são essencialmente invariáveis.

Usando o sistema por unidade, com base nos valores normais, isto é, fluxo de vapor base = fluxo de plena carga, pressão base = pressão nominal, etc., obtém-se os valores típicos dos parâmetros no diagrama de blocos da figura 3.8.

Os valores típicos são os seguintes:

$R$  = coeficiente de atrito =  $2 \times$  (nível de água em p.u.)  $\times$  (queda de pressão em p.u. do tanque de armazenamento até a válvula de controle da turbina em plena carga). Valores:  $R = 0,2$  a plena carga e  $0,1$  a meia carga ou 50% da plena carga.

$K_V$  = coeficiente proporcional a abertura da válvula ou proporcional à carga ( $K_V = 1$  a plena carga e  $K_V = 0$  a vazio);

$T_w = 5$  a  $7$  segundos;

$C_b = 90$  a 300 segundos;

O valor da queda de pressão, em plena carga, é de cerca de 10% ou 0,1 p.u., de modo que, no ponto de operação em plena carga, um valor típico de R é 0,20 p.u.

A constante de armazenamento da caldeira ( $C_b$ ) está relacionada com a massa armazenada de líquido e vapor saturado, bem como com o vapor superaquecido nos superaquecedores e condutores de vapor.

Tipicamente,  $C_b$  representa o tempo, em segundos do fluxo a plena carga, necessário para uma alteração de 1 p.u. na pressão, supondo-se uma relação linear entre a massa armazenada e a pressão. Esta constante de armazenamento varia entre 120 e 300 segundos para caldeira tipo tambor, e de 90 a 200 segundos para unidades com reciclagem.

A figura 3.9 mostra as respostas típicas de pressão da caldeira, para uma variação em degrau na válvula da turbina, quando a caldeira é deixada sem controle com uma entrada permanente de combustível e ar.

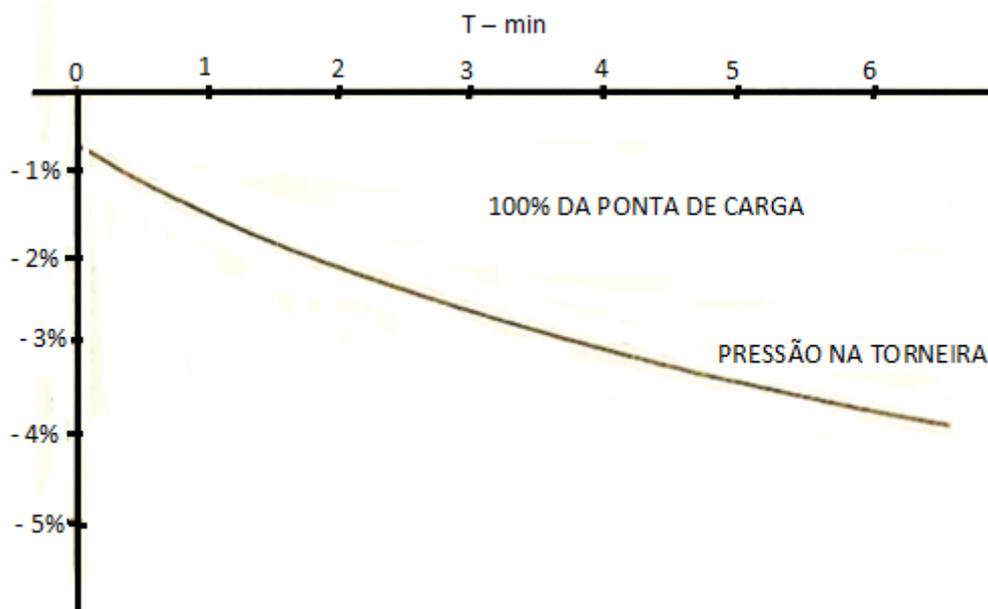


Figura 3.9 – Variação de 5 % na válvula da turbina para caldeira sem controle e entrada permanente de combustível

### 3.3 TURBINAS HIDRÁULICAS

As características de operação das turbinas hidráulicas guardam algumas semelhanças com aquelas das turbinas a vapor. A principal diferença é que apenas um estágio é utilizado para o desenvolvimento de potência. A similaridade é que grandes quantidades de potência são envolvidas, em forma de água em trânsito proveniente do reservatório superior para a turbina, as quais são virtualmente incontroláveis, requerendo assim grandes constantes de tempo [3].

A figura 3.10 ilustra os elementos essenciais de uma usina hidroelétrica típica, isto é, o conjunto turbina-gerador de eixo vertical, o conduto forçado e os reservatórios a montante e a jusante do rio.

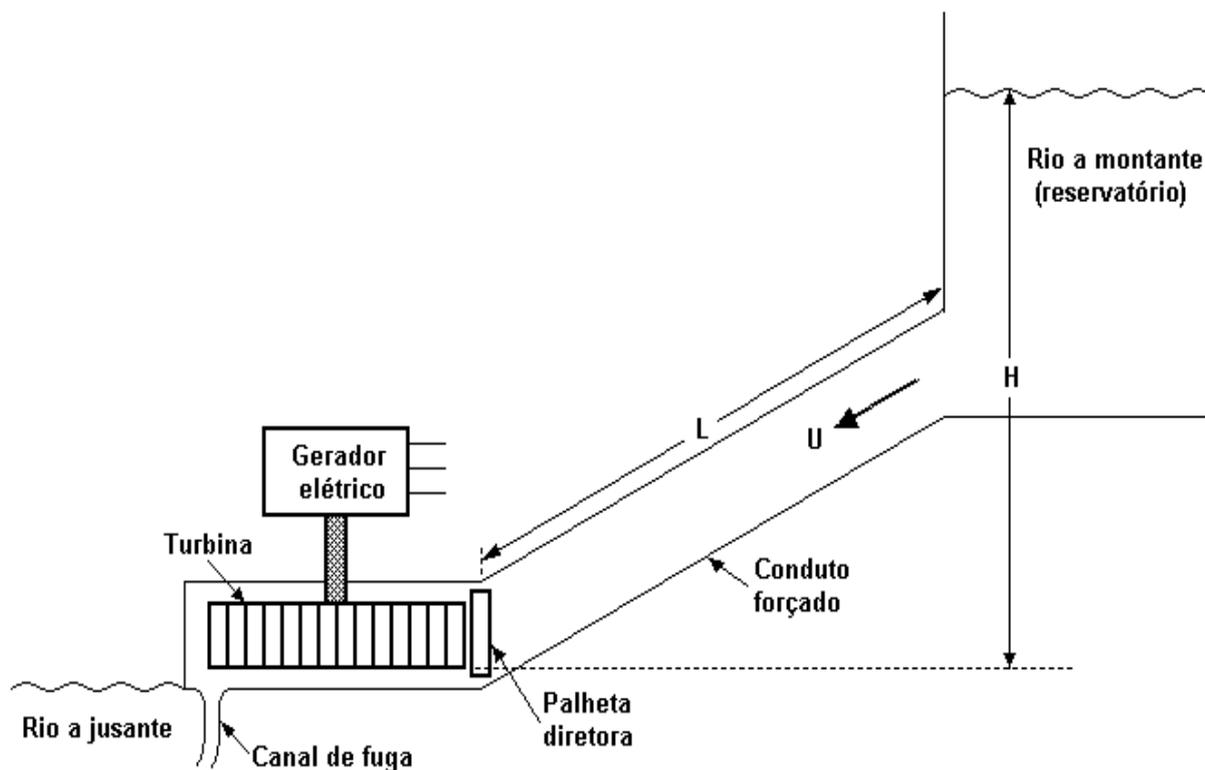


Figura 3.10 - Arranjo esquemático de uma usina hidroelétrica

A performance de uma turbina hidráulica é influenciada pelas características da coluna de água que alimenta a turbina, isto é, a inércia da água, a compressibilidade da água, a elasticidade da parede tubular do conduto forçado.

A inércia da água que flui através da tubulação forçada dá origem a um curioso fenômeno nas turbinas hidráulicas. Após a abertura das palhetas, o efeito inicial é uma queda de pressão na turbina e uma variação negativa na sua potência, pois a pressão está sendo usada para acelerar a coluna de água. Como um resultado disso, a variação inicial da potência da turbina é oposta à variação final e duas vezes maior.

A função de transferência pode ser aproximada pela equação (3.12):

$$\frac{\Delta P_m}{\Delta P_v} = \frac{1 - T_w s}{1 + \left(\frac{T_w}{2}\right) s} \quad (3.12)$$

onde:

$P_m$  = potência mecânica da turbina;

$P_v$  = posição da palheta da turbina;

$T_w$  = tempo de partida da água (varia com o ponto de carga);

As deduções que seguem admitem uma tubulação inelástica e um fluido incompressível. Estas hipóteses podem ser justificadas na maioria dos casos, exceto para tubulações muito longas. Elas são incluídas aqui para explicar os conceitos físicos que dão origem a função de transferência da equação (57).

A figura 3.11 mostra as variáveis pertinentes a uma tubulação forçada e turbina. A velocidade da água na tubulação é dada por:

$$u = G \sqrt{H} \quad (3.13)$$

onde:

$u$  = velocidade da água;

$H$  = pressão hidráulica nas palhetas;

$G$  = fator proporcional à posição das palhetas.

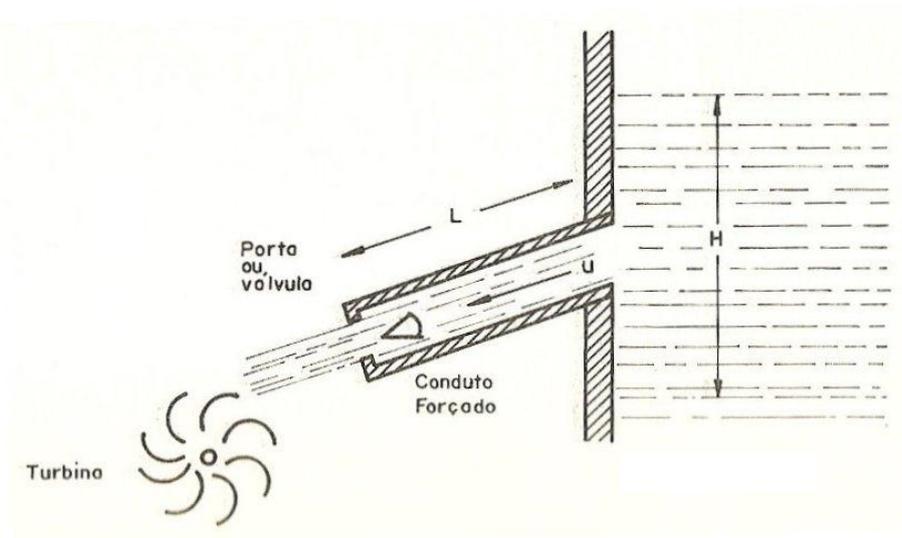


Figura 3.11 – Turbina hidráulica ressaltando a tubulação forçado

Considerando a equação (3.13) em sua condição inicial:

$$u_0 = G_0 \sqrt{H_0}$$

Derivando a equação (3.13) em função do tempo, temos:

$$du = G \frac{1}{2\sqrt{H}} dH + \sqrt{H} dG$$

Na condição inicial  $\rightarrow 0$ , a derivada como variação pela condição inicial

$$\Delta u = G_0 \left( \frac{1}{2\sqrt{H_0}} \right) \Delta H + \sqrt{H_0} \Delta G$$

racionalizando

$$\Delta u = G_0 \frac{\sqrt{H_0}}{2 H_0} \Delta H + \sqrt{H_0} \Delta G$$

substituindo

$$\Delta u = \frac{u_0}{2} \frac{\Delta H}{H_0} + \frac{u_0}{G_0} \Delta G$$

Para pequenas perturbações em torno de um ponto de operação, a equação (3.13) pode ser escrita em forma linearizada e normalizada como:

$$\frac{\Delta u}{u_0} = \frac{1}{2} \frac{\Delta H}{H_0} + \frac{\Delta G}{G_0} \quad (3.14)$$

Pela Lei de Newton pode-se escrever a equação da aceleração da coluna de água como:

$$\sum F = m a = m \frac{du}{dt}$$

$$m = L A \rho$$

$$L A \rho \frac{d(\Delta u)}{dt} = -A \rho g (\Delta H) \quad (3.15)$$

onde:

$\rho$  = massa específica da água;

$A$  = área da tubulação;

$L$  = comprimento da tubulação;

$g$  = aceleração da gravidade.

$\rho L A$  = massa de água na tubulação;

$\rho g (\Delta H)$  = variação incremental da pressão hidráulica nas palhetas da turbina.

A equação (3.15) pode ser normalizada dividindo os dois lados por  $A \rho g H_0 u_0$ .

$$\frac{L A \rho \frac{d(\Delta u)}{dt}}{A \rho g H_0 u_0} = - \frac{A \rho g (\Delta H)}{A \rho g H_0 u_0}$$

$$\frac{L u_0}{g H_0} \frac{d(\Delta u)}{u_0 dt} = - \frac{\Delta H}{H_0}$$

Após aplicar a transformação de Laplace, tem-se:

$$\frac{L u_0}{g H_0} s \left( \frac{\Delta u}{u_0} \right) = - \left( \frac{\Delta H}{H_0} \right) \quad (3.16)$$

ou,

$$T_W s \left( \frac{\Delta u}{u_0} \right) = - \left( \frac{\Delta H}{H_0} \right) \quad (3.17)$$

onde:

$$T_w = \frac{L u_0}{g H_0} = \text{tempo de partida nominal}$$

A constante  $T_w$  pode ser definida como o tempo requerido para acelerar a água na tubulação até a velocidade  $u_0$  sob a ação da pressão  $H_0$ .

Substituindo a equação (3.17) na equação (3.14), pode-se expressar a variação da velocidade como função da posição das palhetas:

$$\frac{\Delta u}{u_0} = \frac{1}{1 + \left(\frac{T_w}{2}\right) s} \frac{\Delta G}{G_0} \quad (3.18)$$

Por outro lado, a potência da turbina é proporcional ao produto da pressão e do fluxo, isto é:

$$P_m \propto H u \quad (3.19)$$

$$P_m = K H u$$

Na condição inicial

$$P_{m_0} = K H_0 u_0$$

$$P_{m_0} + \Delta P_m = K (H_0 + \Delta H)(u_0 + \Delta u)$$

$$P_{m_0} + \Delta P_m = K H_0 u_0 + K \Delta H u_0 + K H_0 \Delta u + K \Delta H \Delta u$$

$$P_{m_0} + \Delta P_m = P_{m_0} + K \Delta H u_0 + K H_0 \Delta u + 0$$

$$\Delta P_m = K \Delta H u_0 + K H_0 \Delta u$$

Expandindo esta expressão na forma linearizada e normalizando, obtém-se:

$$\frac{\Delta P_m}{P_{m_0}} = \frac{K \Delta H u_0}{K H_0 u_0} + \frac{K H_0 \Delta u}{K H_0 u_0}$$

$$\frac{\Delta P_m}{P_{m_0}} = \frac{\Delta H}{H_0} + \frac{\Delta u}{u_0} \quad (3.20)$$

Substituindo as equações (3.17) e (3.18) na equação (3.20), obtém-se:

$$\frac{\Delta P_m}{P_{m_0}} = \frac{1 - T_w s}{1 + \left(\frac{T_w}{2}\right) s} \frac{\Delta G}{G_0} \quad (3.21)$$

A figura 3.11 mostra a resposta de uma turbina hidráulica típica a uma variação na posição das palhetas.

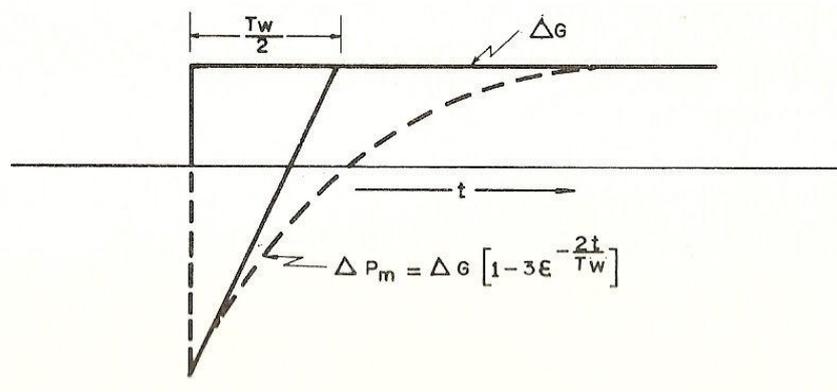


Figura 3.12 – Resposta de uma turbina hidráulica típica a uma variação na posição das palhetas

Da dedução acima está claro que o valor linearizado de  $T_w$ , na função de transferência da equação (3.21), é proporcional ao ponto de carga. Isto é,  $T_w$ , em 50% de plena carga, é aproximadamente a metade de seu valor a plena carga.

Existem outros fenômenos dinâmicos que ocorrem nas turbinas hidráulicas. Um deles é devido à compressibilidade da água e à expansão elástica da tubulação, dando origem a ondas viajantes conhecidas como “golpe de aríete”, usualmente de frequência suficientemente alta para não preocupar.

A figura 3.13 mostra o diagrama de blocos das relações não lineares para as turbinas hidráulicas

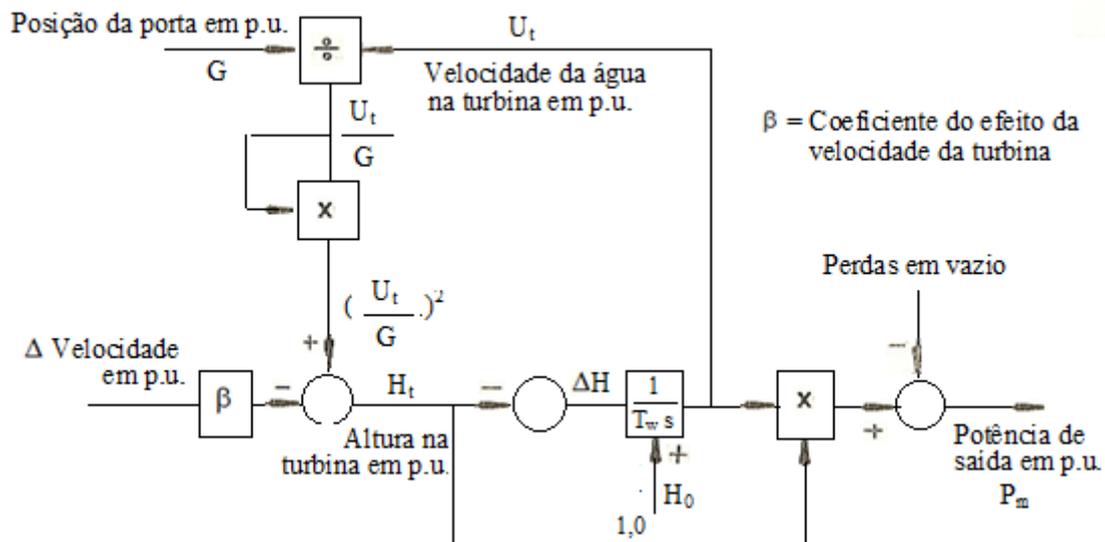


Figura 3.13 – Diagrama de blocos para as turbinas hidráulicas

A potência produzida por um gerador é determinada pelas propriedades dinâmicas da turbina e de seu regulador de velocidade. Assim, para ser capaz de determinar o comportamento dinâmico da frequência, é necessário um modelo para a turbina assim como para o seu controle.

Tudo isto implica também em características de controle similares entre estas turbinas (hidráulica e a vapor), sendo que a diferença mais importante consiste no fato de que, em geral, a inércia de uma turbina hidráulica é menor do que aquela de uma turbina a vapor de mesma capacidade. Isto, claramente tem implicações em estudos de estabilidade transitória e rejeição de carga.

### 3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os conceitos e definições para o movimento rotativos, permitiu a abordagem dos tópicos referentes às máquinas motrizes com turbinas a vapor e turbinas hidráulicas.

Neste capítulo deduziram-se as equações:

$$\frac{\Delta P_m}{\Delta P_V} = \frac{1}{1 + s T_s} \quad \text{Turbina a vapor sem reaquecimento}$$

$$\frac{\Delta P_m}{\Delta P_V} = \frac{1 + c T_R s}{(1 + T_s s)(1 + T_R s)} \quad \text{Turbina a vapor com reaquecimento}$$

$$\frac{\Delta P_m}{\Delta P_V} = \frac{1 - T_W s}{1 + \left(\frac{T_W}{2}\right) s} \quad \text{Turbina hidráulica}$$

Estas equações estarão associadas de um lado aos reguladores de velocidades e ao outro lado aos geradores, os quais permitirão o desenvolvimento deste trabalho.

Os modelos foram apresentados através de diagramas de blocos que representam as características dinâmicas das máquinas motrizes no acionamento dos geradores para o fornecimento de energia elétrica.

A associação da turbina ao gerador permitirá as primeiras simulações utilizando o *software ScicosLab*.

Os reguladores de velocidade (controle primário) serão temas do próximo capítulo.

## Capítulo IV

# CONTROLE PRIMÁRIO DE CARGA-FREQUÊNCIA

### 4.1 INTRODUÇÃO

Tendo descrito as características dinâmicas de algumas máquinas motrizes e sistemas de fornecimento de energia, prossegue agora descrevendo o próximo elo da cadeia, identificado pelos “controles primários de carga-frequência”. Historicamente, eles formam os denominados “reguladores de velocidades”. Entretanto, o termo “regulador” implica em um sensor mecânico de velocidade conectado mecanicamente às variações de controle na potência de entrada, e, visto que, hoje a maioria dos controles de carga-frequência são eletro-hidráulicos, o termo regulador de velocidade já não descreve de maneira global esta função de controle.

Utiliza-se o software ScicosLab para representar graficamente as variações de frequência, potência na linha de interligação e potência gerada devido ao controle primário de carga-frequência.

### 4.2 REGULADOR ISÓCRONO

Os reguladores isócronos apresentam algumas limitações, como por exemplo, instabilidade e, além disso, não propiciam uma divisão adequada da potência entre as máquinas em sistemas interligados.

Um mecanismo simples de regulação é descrito na figura 4.1 – esquema de regulador de velocidade do tipo “isócrono”

Desvios na velocidade, captados pelo corpo centrífugo (“flyballs”), causam deslocamento  $\Delta x$  da válvula piloto, o que faz o óleo fluir através do servo-motor principal.

Este servo-motor, por sua vez, fecha ou abre a válvula ou palhetas da turbina, dependendo da direção de  $\Delta x$ .

É importante observar que um deslocamento  $\Delta x$  da válvula piloto causa uma taxa de variação do pistão do servo-motor, ou uma taxa de variação na posição de válvula.

O estado de equilíbrio é alcançado quando a pressão do óleo, em ambos os lados do pistão do servo-motor, for igual [07].

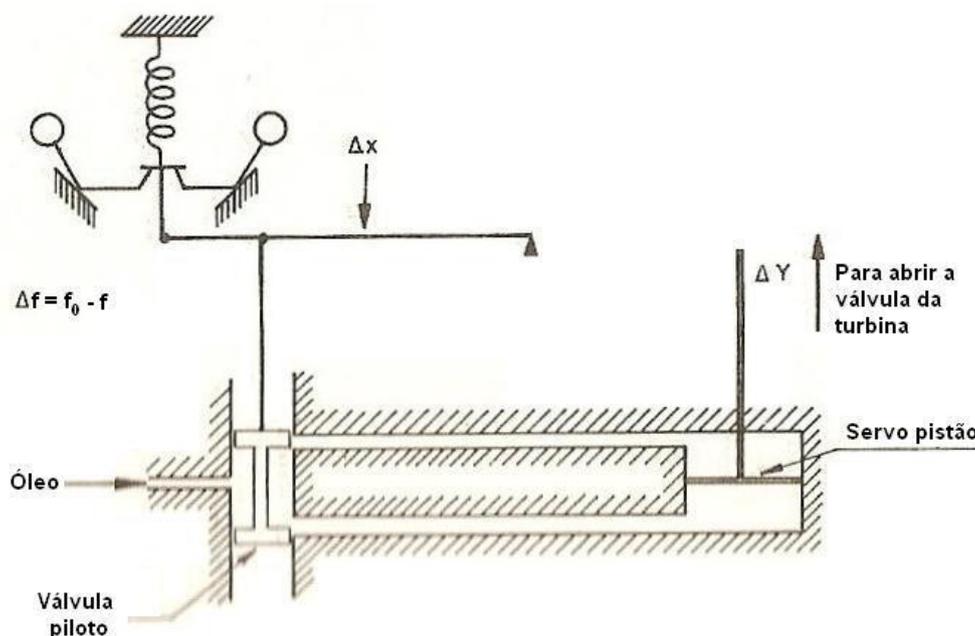


Figura 4.1 – Esquema de regulador de velocidade do tipo “isócrono”

Com referência a figura 4.1 pode-se escrever para a posição da válvula piloto ( $\Delta x$ ):

$$\Delta x = k_1 \Delta f \quad (4.1)$$

onde:

$\Delta f$  = desvio de frequência ( $f_0 - f$ );

$k_1$  = constante de proporcionalidade.

Também para a posição de válvula da turbina ( $\Delta y$ ), tem-se:

$$\frac{d(\Delta y)}{dt} = k_2 \Delta x \quad (4.2)$$

onde:

$k_2$  = constante de proporcionalidade.

$$\frac{d(\Delta y)}{dt} = k_1 k_2 \Delta f$$

ou

$$\Delta y = \int k_1 k_2 \Delta f dt \quad (4.3)$$

Estas equações estão apresentadas no diagrama de blocos do regulador de velocidade (tipo isócrona) - figura 4.2.

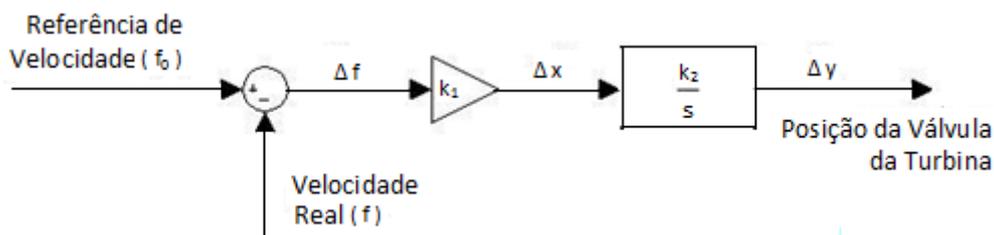


Figura 4.2 – Diagrama de blocos do regulador de velocidade (tipo isócrona).

Por causa da ação integradora do servo-motor principal, é evidente que  $\Delta y$  alcançará um novo estado de equilíbrio somente quando  $\Delta f$  chegar a zero.

O regulador com a configuração da figura 4.1 irá, portanto, reduzir o erro de frequência para zero no estado de equilíbrio e movimentar a posição da válvula para qualquer posição que seja necessária para fazer tal redução. Ele é conhecido como um **regulador isócrona**.

Observe que um desvio de frequência pode ocorrer tanto por variação da frequência real, como por alteração no valor de referência  $f_0$ , que é realizado por meio de uma alteração no ponto pivô (a), geralmente através de um mecanismo de parafuso sem fim, acionado por um “motor de sincronização”, ou motor de alteração do nível de velocidade.

Reguladores isócronos não são usados em sistemas de múltiplas máquinas, por causa da necessidade da divisão adequada de carga entre as máquinas. A divisão própria é assegurada prevendo uma regulação ou queda de velocidade na ação do regulador ou controle de velocidade.

### 4.3 REGULADOR COM QUEDA DE VELOCIDADE

Para corrigir as características indesejáveis do regulador, introduz-se a conexão entre o servo-motor principal e a válvula piloto, formando-se assim o regulador com queda de velocidade. A figura 4.3 mostra o esquema de um regulador com queda de velocidade ou regulação de estado de equilíbrio.

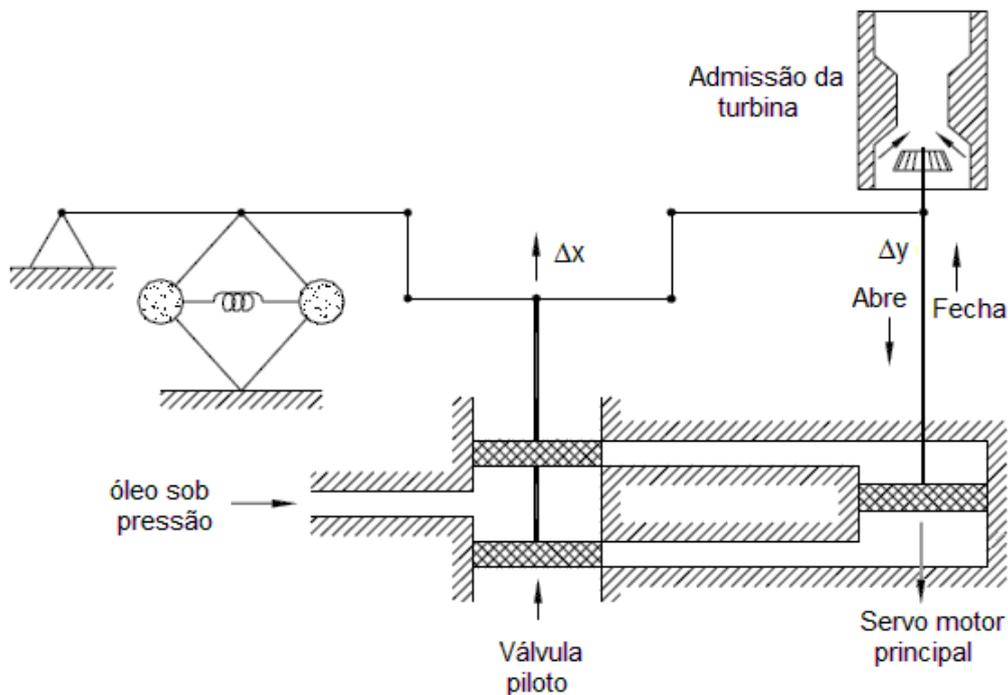
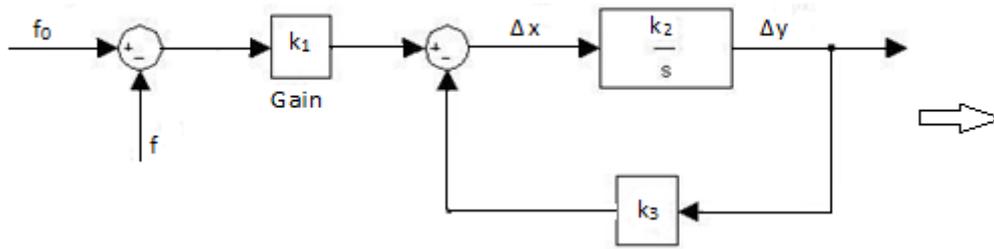


Figura 4.3 – Esquema de regulador de velocidade do tipo “queda de velocidade”.

Com referência ao diagrama de blocos do regulador isócrono da figura 4.2, o efeito da conexão de realimentação, na figura 4.3, é representado por um ganho  $K_3$ , como na figura 4.4.- diagrama de blocos do regulador com queda de velocidade da figura 4.3.



(a) Forma completa do Regulador com queda de velocidade.

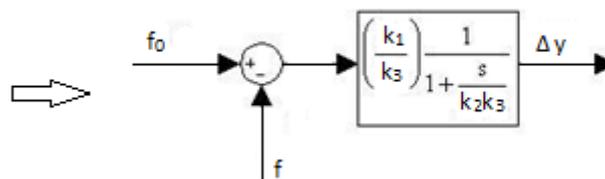


Figura 4.4 – Diagrama de blocos do regulador com queda de velocidade.

A figura 4.5 – diagrama de bloco da função transferência do regulador com queda de velocidade, mostra a resposta no tempo, das válvulas controladas pelo regulador, a uma variação em degrau no desvio de frequência.  $T_G$  é conhecido como constante de tempo do regulador equação (4.4), geralmente da ordem de uma fração de segundo (0,5 s).

$$\frac{\Delta \text{válvula (pu)}}{\Delta \text{frequência (pu)}} = \frac{1}{R(1 + s T_G)} \quad (4.4)$$

Função de transferência é apresentada figura 4.5

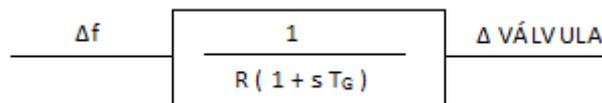


Figura 4.5 – Diagrama de bloco da função transferência do regulador com queda de velocidade

Da função de transferência da figura 4.6 – resposta das válvulas controladas pelo regulador de velocidade a uma variação em degrau no desvio de frequência, indicada em 4.4, pode-se notar que o valor de estado de equilíbrio do desvio de frequência  $\Delta f$  exigido para

produzir uma variação de 1 p.u. na posição da válvula da turbina  $\Delta V$  é R. Este parâmetro é conhecido como “**regulação de velocidade**”

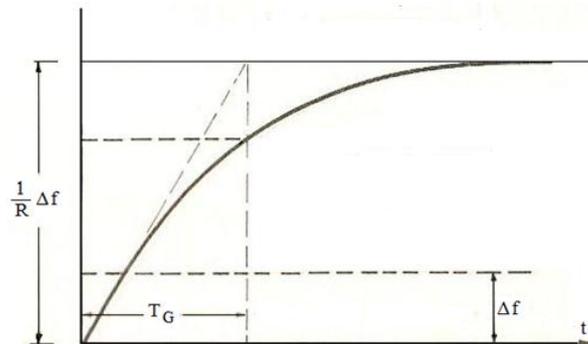


Figura 4.6 – Resposta das válvulas controladas pelo regulador de velocidade da figura 4.3 a uma variação em degrau no desvio de frequência

O parâmetro R pode ser também expresso em porcentagem como na equação (4.5).

$$R\% = \frac{|N_0 - N|}{N_R} \times 100\% \quad (4.5)$$

onde:

$N_0$  = velocidade do estado de equilíbrio a vazio (válvulas fechadas);

$N$  = velocidade do estado de equilíbrio a plena carga (válvulas totalmente abertas);

$N_R$  = velocidade nominal.

Assim, uma regulação de 5% significa que um desvio de frequência de 5% causa 100% de variação na potência ou na saída da válvula. Na terminologia de controle de processos, o regulador seria caracterizado como um controle proporcional com um ganho proporcional de  $1/R$ , ou uma faixa proporcional de  $R \times 100\%$

#### 4.4 REGULADOR DE VELOCIDADE COM COMPENSAÇÃO DE QUEDA TRANSITÓRIA

Em razão de suas características peculiares de resposta, as turbinas necessitam de reguladores especiais com queda transitória para comportamento de controle de velocidade

estável. O termo “queda transitória” implica em que, para desvios rápidos na frequência, o regulador demonstra uma alta regulação (baixo ganho), enquanto que, para variações lentas e no estado de equilíbrio, o regulador tem uma baixa regulação (alto ganho).

O esquema da figura 4.7 mostra a adição de uma realimentação transitória através de uma câmara de óleo com um orifício, em relação ao esquema do compensador com queda de velocidade [07].

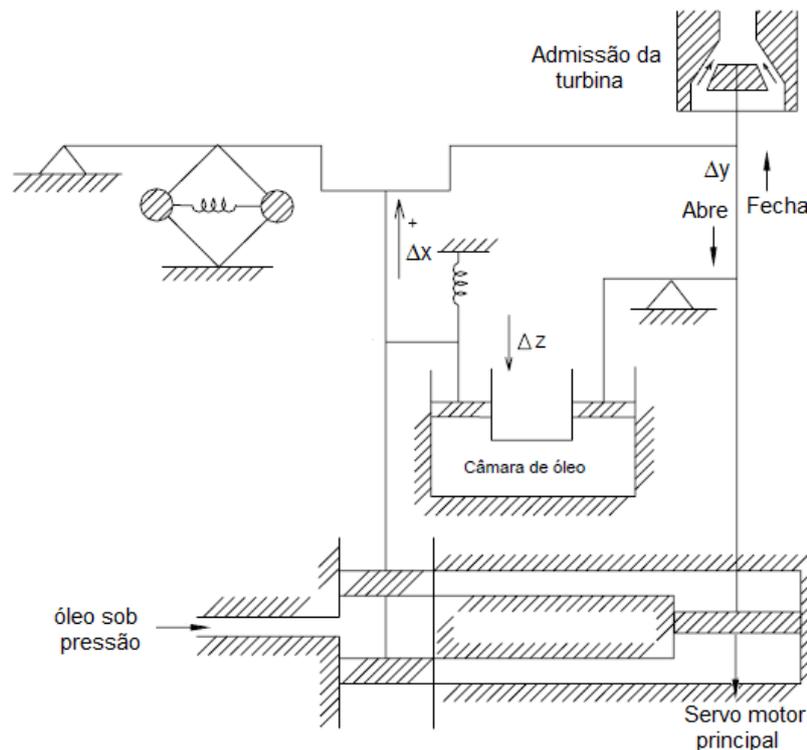


Figura 4.7 – Esquema de um regulador de velocidade com realimentação transitória

A função de transferência da realimentação transitória adicional  $\Delta z$  para a posição de válvula  $\Delta y$  pode ser obtida como segue. A transição do movimento, pelo fluido incompressível na câmara C, é:

$$-\Delta Z = k_4 \Delta y - \int \frac{Q^0}{A} dt \quad (4.6)$$

onde

$Q^0$  = vazão do fluido para fora da câmara C;

$A$  = área do pistão;

$k_4$  = constante devida às relações dos comprimentos das alavancas.

Por outro lado, a pressão no fluido é proporcional ao deslocamento  $\Delta z$  devido à compressão da mola e a vazão  $Q^0$  é proporcional à pressão. Assim, pode-se escrever:

$$\frac{Q^0}{A} = -k_5 \Delta Z \quad (4.7)$$

substituindo a equação (4.7) na equação (4.6) obtém-se a equação (4.8):

$$-\Delta Z = k_4 \Delta y + \int k_5 \Delta Z dt \quad (4.8)$$

ou na forma operacional,

$$-\Delta Z(s) \left(1 + \frac{k_5}{s}\right) = k_4 \Delta Y(s)$$

isto é:

$$\frac{\Delta Z(s)}{\Delta Y(s)} = -\frac{k_4}{1 + \frac{k_5}{s}} = -\frac{k_4 s}{k_5 \left(1 + \frac{s}{k_5}\right)} \quad (4.9)$$

Assim, o diagrama de blocos do regulador simples com queda de velocidade, da figura 4.4, é modificado pela realimentação adicional, como mostra a figura 4.8 - diagrama de blocos de um regulador de velocidade com realimentação transitória.

A função de realimentação transitória reduz o ganho para variações rápidas, mas, como no estado de equilíbrio sua saída é nula, o ganho no estado de equilíbrio é o mesmo do caso da figura 4.8.

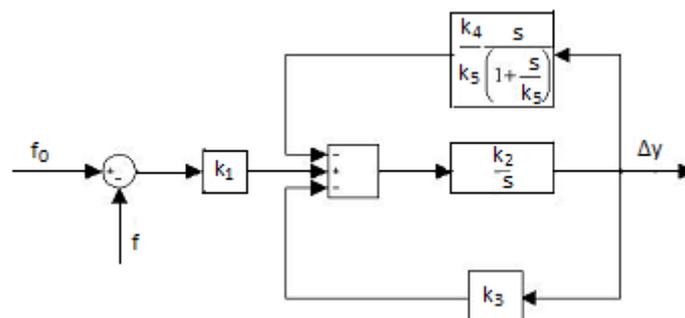


Figura 4.8 – Diagrama de blocos de um regulador de velocidade com realimentação transitória

A função de transferência global é encontrada pela realimentação do diagrama de blocos da figura 4.8.

$$\frac{\Delta y(s)}{\Delta f(s)} = \frac{\frac{-k_1 k_2}{k_2 k_3 + s}}{1 + \left(\frac{k_2}{k_2 k_3 + s}\right) \left(\frac{k_4 s}{k_5 + s}\right)}$$

ao ser fatorada e substituída, resulta na equação (4.10)

$$\frac{\Delta \text{válvula}(\text{pu})}{\Delta \text{Frequência}(\text{pu})} = \frac{1 + s T_r}{R \left(1 + s \frac{r T_r}{R}\right) (1 + s T_G)} \quad (4.10)$$

onde

R = regulação do estado de equilíbrio;

r = regulação transitória

$r T_r / R$  = constante de tempo de escoamento;

$T_G$  = constante de tempo do regulador.

O diagrama de blocos do regulador de velocidade com compensação transitória é mostrado, na figura 4.9

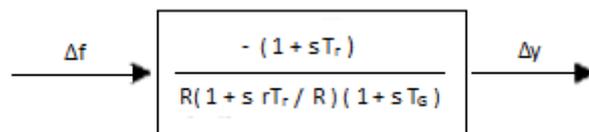


Figura 4.9 – Diagrama de blocos função transferência do compensador de velocidade com queda transitória

A figura 4.10 descreve as características dos três tipos de reguladores ou dispositivos de controle de velocidade apresentados anteriormente.

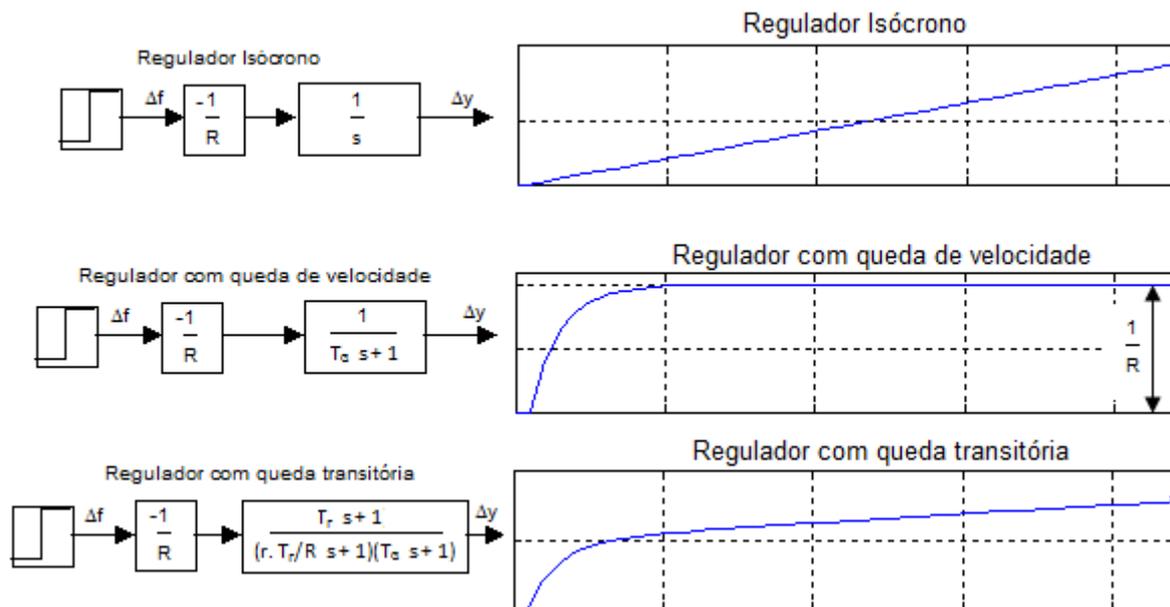


Figura 4.10 – Características dos três tipos de reguladores de velocidade

A figura 4.11 apresenta o diagrama de blocos de uma área isolada representada por uma inércia combinada única, sendo acionada por três diferentes tipos de máquinas com seus respectivos controles de velocidade.

Na figura 4.10 utilizou-se a seguinte notação:

$M = \Sigma (M_S + M_R + M_H) =$  momentum de inércia combinado;

$D = \partial P_L / \partial \omega =$  característica de amortecimento da carga;

$R_s =$  Regulação do vapor sem reaquecimento;

$R_r =$  Regulação do vapor com reaquecimento;

$R_h =$  Regulação do estado de equilíbrio do sistema hidráulico;

$r_h =$  Regulação transitória do sistema hidráulico;

$T_R =$  Constante de tempo do reaquecedor;

$T_w =$  Tempo de partida da inércia da água;

$T_S =$  Tempo de carregamento da turbina a vapor;

$T_G =$  Constante de tempo do regulador;

$T_r =$  Tempo de escoamento do regulador hidráulico.

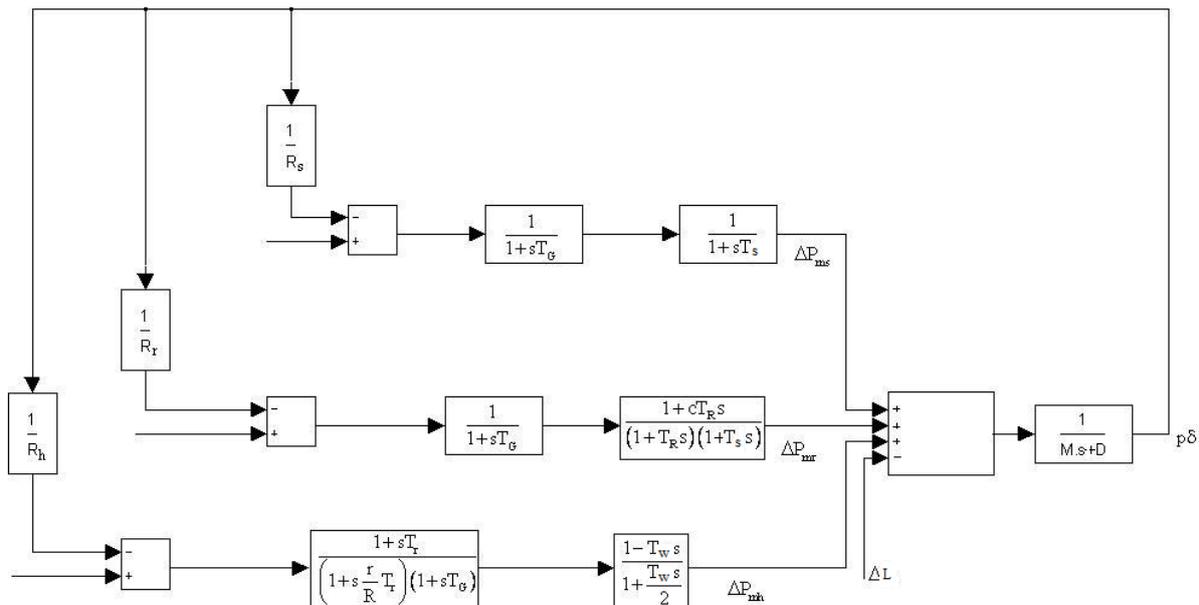


Figura 4.11 – Diagrama de blocos de uma área isolada com três máquinas com seus reguladores de velocidades

O comportamento do sistema sob esses controles primários de carga-frequência é também conhecido como “sub-regulação [03].

## 4.5 COMPORTAMENTO DO CONTROLE PRIMÁRIO DE CARGA-FREQUÊNCIA

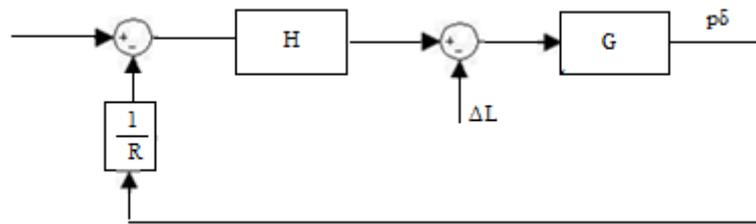
Na Dinâmica da Geração, englobando os controles de Carga-Frequência e da Regulação de Velocidade, diz respeito ao comportamento de todos os sistemas de potência em relação à frequência e potência nas linhas de interligação.

### 4.5.1 Regulação de Velocidade de Área Isolada

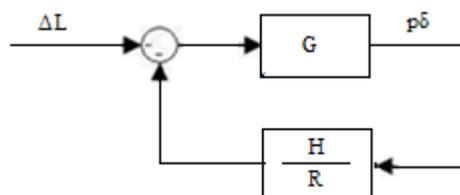
Será examinado agora o comportamento transitório de um sistema de potência isolado sujeito a uma variação de carga ( $\Delta L$ ), levando-se em conta o regulador ou o controle de velocidade, através do *software ScicosLab* [02].

A figura 4.12 mostra simplificações do diagrama de blocos com o objetivo de se chegar a uma expressão ou função de transferência entre desvio de frequência e variação de

carga, levando-se em conta as características do sistema de potência e do regulador da máquina primária.



(a) Forma completa do desvio de frequência.



(b) Primeira simplificação do desvio de frequência.

Resultado final das simplificações do desvio de frequência em função da variação de carga:

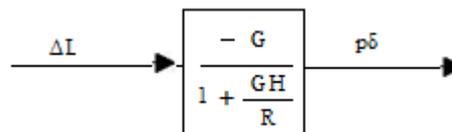


Figura 4.12 – Simplificação final no diagrama de bloco do desvio de frequência.

$G$  = função de transferência do sistema de potência =  $1/(MS+D)$

$H$  = função de transferência do regulador e da máquina motriz

A resposta no tempo, do desvio de frequência que segue a uma variação de carga em degrau  $\Delta L$  nesses sistemas, pode ser conseguida tomando a transformada inversa da função  $(\Delta L/s)[-G/(1+GH/R)]$ , ou pela solução do sistema de equações diferenciais em um computador.

Pelo teorema do valor final, o desvio final da frequência do estado de equilíbrio pode ser obtido tomando-se o valor de estado de equilíbrio da função de transferência multiplicado por  $\Delta L$  (isto é, o valor da função para  $s = 0$ ).

$$p\delta \text{ no estado de equilíbrio} = \Delta L \left. \frac{-G}{1 + GH/R} \right|_{s=0} \quad (4.11)$$

Assim, substituindo os correspondentes valores de G e H, o valor final do desvio da frequência no estado de equilíbrio será a equação (4.12)

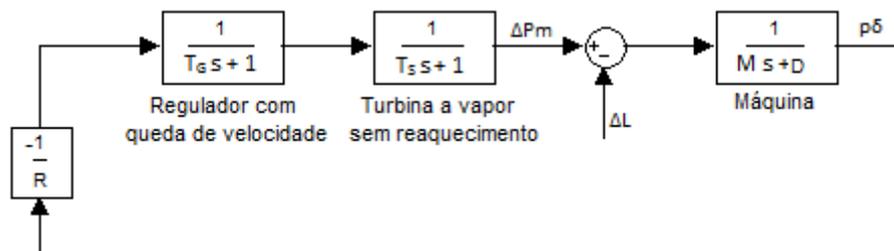
$$p\delta = \frac{-\Delta L}{\frac{1}{R} + D} \quad (4.12)$$

Embora, para o mesmo valor de R e D, o desvio final será o mesmo para os três tipos de sistemas de potência, conforme apresentado em (4.12), existem diferenças marcantes no comportamento do regime transitório entre esses sistemas (valores de pico e de tempo de recuperação).

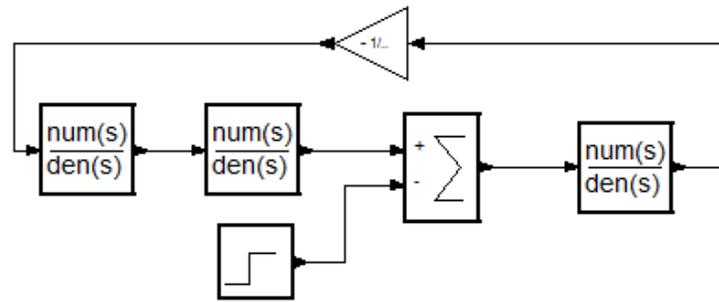
A figura (a) representa o Diagrama de bloco convencional, mostrando os componentes do gerador, da turbina a vapor sem reaquecimento associado a este o regulador com queda de velocidade e a figura (b) o Diagrama de bloco com representação usual do *ScicosLab*, assim a figura 4.13 mostra a Turbina a vapor sem reaquecimento.

Para a turbina a vapor sem reaquecimento, foram utilizados os seguintes valores:

$$M = 10 \text{ s}; D = 1 \text{ p.u.}; T_G = 0,25 \text{ s}; T_S = 0,5 \text{ s}; R = 0,1 \text{ p.u.}; \Delta L = 0,05 \text{ p.u.}$$



(a) Diagrama de blocos convencional



((b) Representação no *ScicosLab*

Figura 4.13 – Diagrama de blocos da Turbina a vapor sem reaquecimento

A figura 4.14 mostra o resultado da simulação realizada com o *Software ScicosLab*, na Turbina a vapor sem reaquecimento.

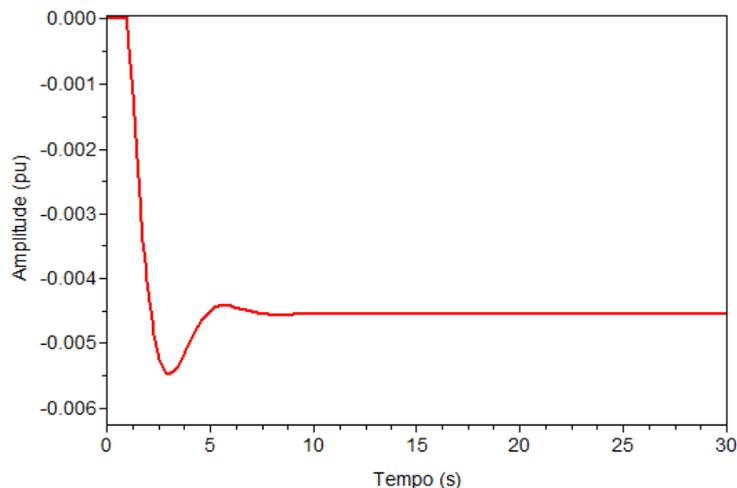
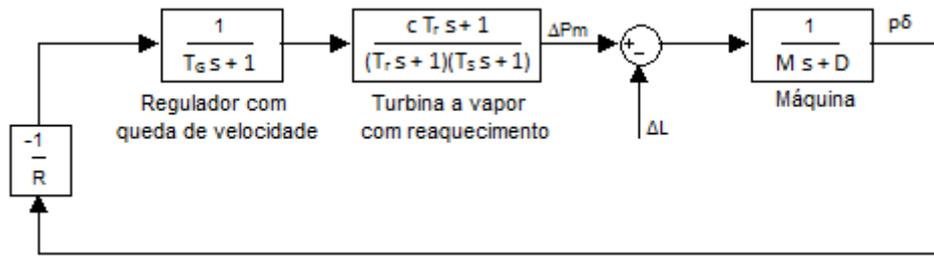


Figura 4.14 – Desvio de frequência  $p\delta$  da turbina a vapor sem reaquecimento

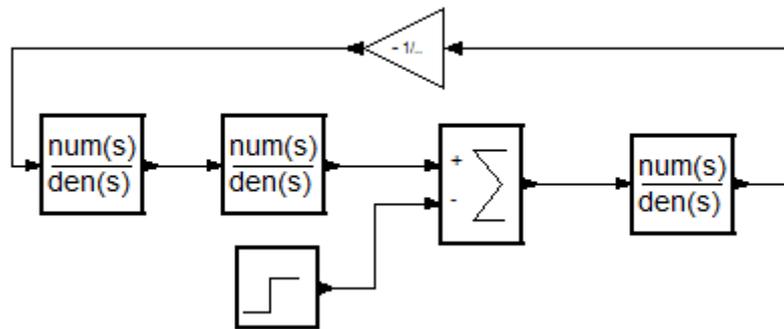
A figura (a) representa o Diagrama de bloco convencional, mostrando os componentes do gerador, da turbina a vapor com reaquecimento associado a este o regulador com queda de velocidade e a figura (b) o Diagrama de bloco com representação usual do *ScicosLab*, assim a figura 4.15 mostra a Turbina a vapor com reaquecimento.

Para o gerador, turbina a vapor com reaquecimento e do regulador, foram utilizados os seguintes valores:

$$M = 10 \text{ s}; D = 1 \text{ p.u.}; T_r = 0,25 \text{ s}; T_G = 0,25 \text{ s}; T_S = 0,5 \text{ s}; c = 0,25 \text{ p.u.}; R = 0,1 \text{ p.u.}; \Delta L = 0,05 \text{ p.u.}$$



(a) Diagrama de blocos convencional



(b) Representação no *ScicosLab*

Figura 4.15 – Diagrama de blocos da Turbina a vapor com reaquecimento

A figura 4.16 mostra o resultado da simulação realizada com o *Software ScicosLab*, na Turbina a vapor com reaquecimento.

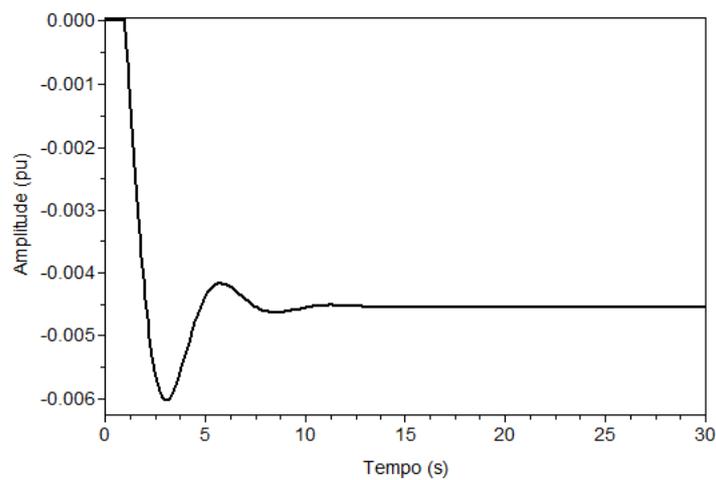


Figura 4.16 – Desvio de frequência  $p\delta$  da Turbina a vapor com reaquecimento

Para efeito de comparação as curvas das figuras 4.14 e 4.16 foram colocadas em um único gráfico e apresentada na figura 4.17.

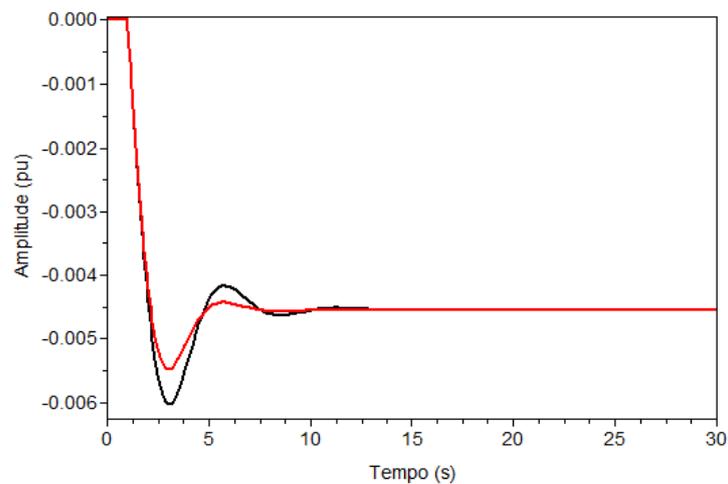


Figura 4.17 - Desvio de frequência  $p\delta$  da turbina a vapor para os dois casos: sem reaquecimento (vermelho), com reaquecimento (preto)

A figura 4.17 apresenta o comportamento do desvio da frequência na região em regime transitório dos dois tipos de turbinas: em vermelho a turbina a vapor sem reaquecimento e em preto com reaquecimento e na continuidade visualiza-se que em regime permanente, que as mesmas obedecem a equação matemática (4.12):

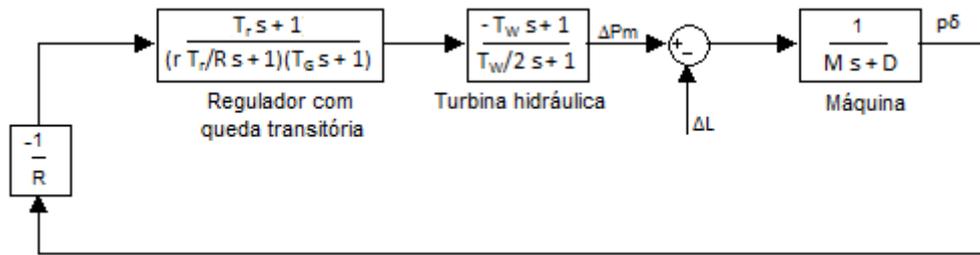
$$p\delta = \frac{-\Delta L}{\frac{1}{R} + D} = \frac{-0,05}{\frac{1}{0,1} + 1} = -0,00455 \text{ p.u}$$

Observa-se que o resultado matemático é o valor apresentado na figura 4.17.

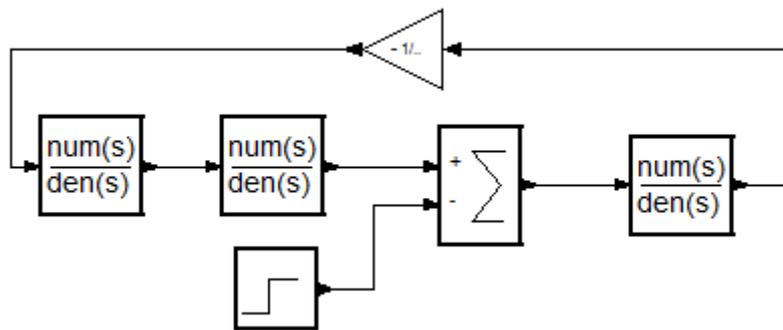
A figura (a) representa o Diagrama de bloco convencional, mostrando os componentes do gerador, da turbina hidráulica associada a este o regulador com queda transitória e a figura (b) o Diagrama de bloco com representação usual do *ScicosLab*, assim a figura 4.18 mostra a Turbina hidráulica.

Para o gerador, turbina hidráulica e do regulador, foram utilizados os seguintes valores:

$$M = 10 \text{ s}; D = 1 \text{ p.u}; T_r = 8 \text{ s}; T_G = 0,6 \text{ s}; r = 0,25 \text{ p.u}; T_w = 4\text{s}, R = 0,1 \text{ p.u}; \Delta L = 0,05 \text{ p.u.}$$



(a) Diagrama de blocos convencional



(b) Representação ScicosLab

Figura 4.18 – Diagrama de blocos da Turbina hidráulica.

A figura 4.19 apresenta a simulação do desvio de frequência  $p\delta$  da turbina hidráulica.

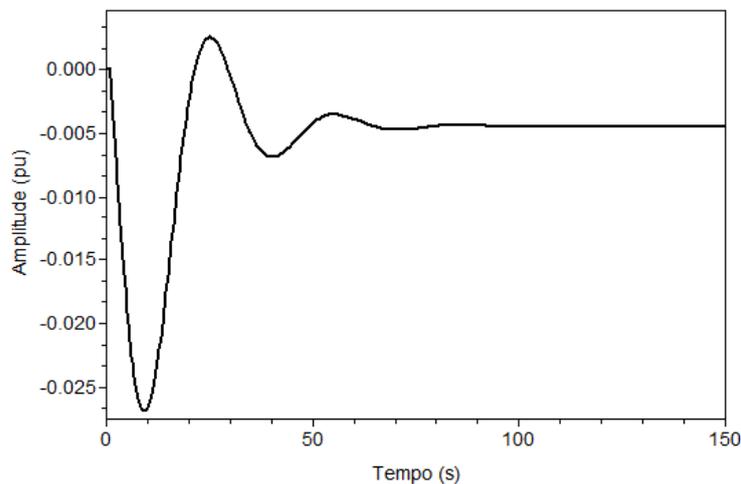


Figura 4.19 - Desvio de frequência  $p\delta$  da Turbina hidráulica

A figura 4.19 apresenta a resposta do desvio de frequência na região do regime transitório da turbina hidráulica e que em regime permanente, obedece a equação matemática (4.12):

$$p\delta = \frac{-\Delta L}{\frac{1}{R} + D} = \frac{-0,05}{\frac{1}{0,1} + 1} = -0,00455 \text{ p. u.}$$

Observa-se que o resultado matemático é o valor apresentado na figura 4.19.

Para um sistema composto de várias máquinas motrizes com reguladores individuais, o desvio final de frequência, que se segue a uma variação de carga, serão dadas pelas equações (4.13) e (4.14):

$$p\delta = \frac{-\Delta L}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \dots \dots \dots + D} \quad (4.13)$$

ou

$$p\delta = \frac{-\Delta L}{\frac{1}{R_{eq}} + D} \quad (4.14)$$

onde  $R_{eq}$  é a regulação do regulador equivalente da área, expresso pela equação (4,15):

$$R_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots \frac{1}{R_n}} \quad (4.15)$$

A quantidade  $[(1/ R_{eq}) + D]^{-1}$  é denominada “**característica de regulação composta da área**”, que inclui tanto a regulação de regime permanente da máquina motriz como também o amortecimento da carga.

Um valor representativo desta característica de regulação composta, para sistemas a vapor com algumas unidades na faixa de regulação e outras com os reguladores bloqueados ou válvulas completamente abertas, está situado entre 15 e 20% na base do sistema.

No caso geral de sistemas interconectados, o sistema de potência se apresenta como um sistema infinito para a unidade individual, de maneira que, uma vez sincronizado, o efeito dos ajustes da referência de carga-frequência é basicamente um efeito de modificação da carga naquela unidade.

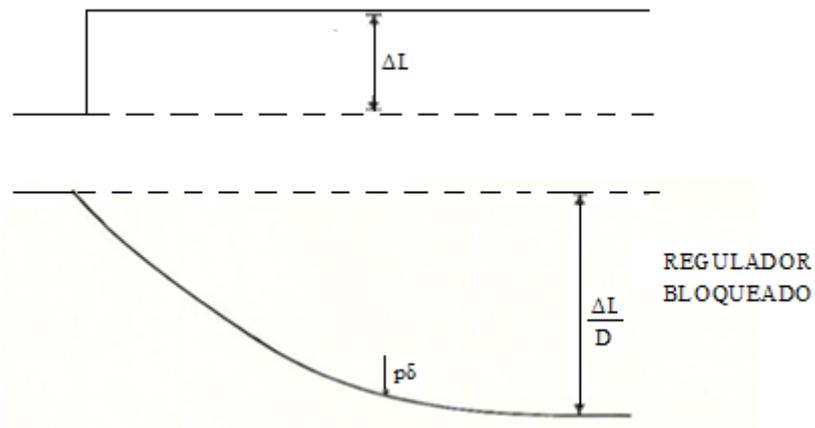


Figura 4.20 – Variação de carga (acrécimo) em degrau e a natureza da resposta do desvio de frequência

Para ilustrar, veja a figura 4.21 que através do *software ScicosLab* mostra a resposta do desvio de frequência para uma turbina a vapor sem reaquecimento com seu regulador bloqueado. A sua variação de frequência  $p\delta$  no regime permanente para uma variação de carga  $\Delta L = 0,05$  p.u.  $1/R = 0$  e  $D = 1$  p.u. a equação 4.12 será reduzida a:

$$p\delta = \frac{-\Delta L}{D} = -\frac{0,05}{1} = -0,05 \text{ p.u.}$$

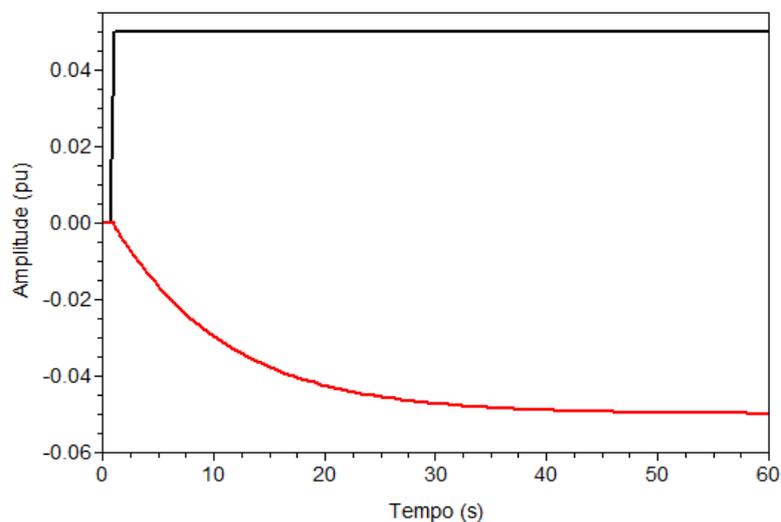


Figura 4.21 – Desvio efetiva da frequência  $p\delta$  (vermelho) da Turbina a vapor sem reaquecimento e a variação de carga (preto) com o regulador bloqueado

A figura 4.22, ilustra a natureza da resposta do desvio de frequência para uma turbina a vapor sem reaquecimento, mas com o regulador desbloqueado.

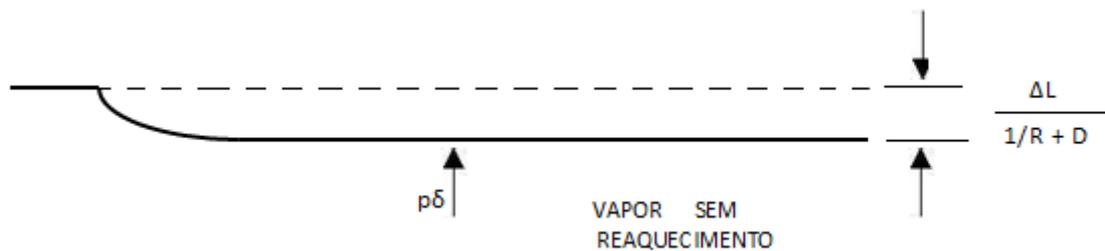


Figura 4.22 – Natureza da resposta do desvio de frequência para uma turbina a vapor sem reaquecimento para a mesma variação de carga (acrécimo)

A figura 4.23, através do *ScicosLab* mostra a resposta da frequência para uma turbina a vapor sem reaquecimento, mas com regulador desbloqueado, considerando  $\Delta L = 0,05$  pu,  $D = 1$  pu e  $R = 0,1$  p.u.

$$p\delta = \frac{-\Delta L}{\frac{1}{R} + D} = \frac{-0,05}{10 + 1} = -0,0045 \text{ p.u}$$

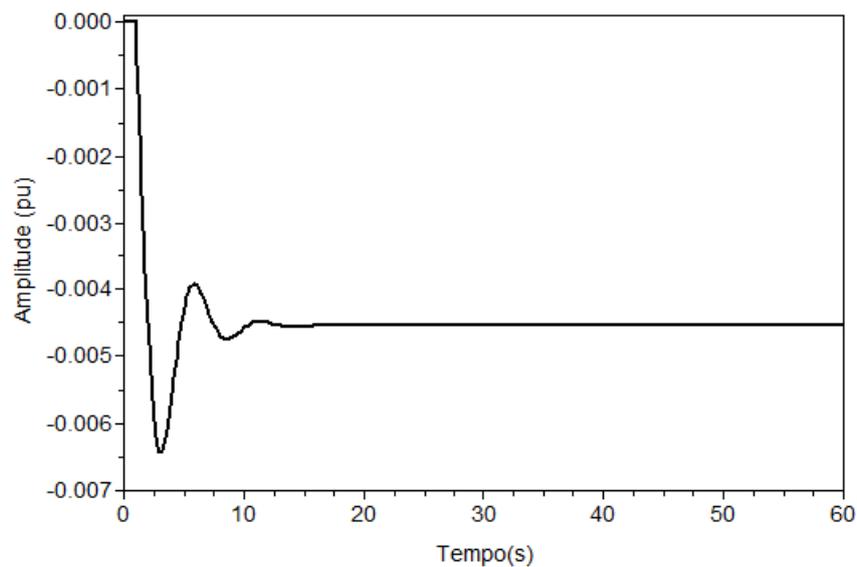


Figura 4.23 – Desvio efetiva de frequência  $p\delta$  da Turbina a vapor sem reaquecimento com o regulador desbloqueado.

A natureza da resposta de frequência de uma turbina hidráulica está representada na figura 4.24.

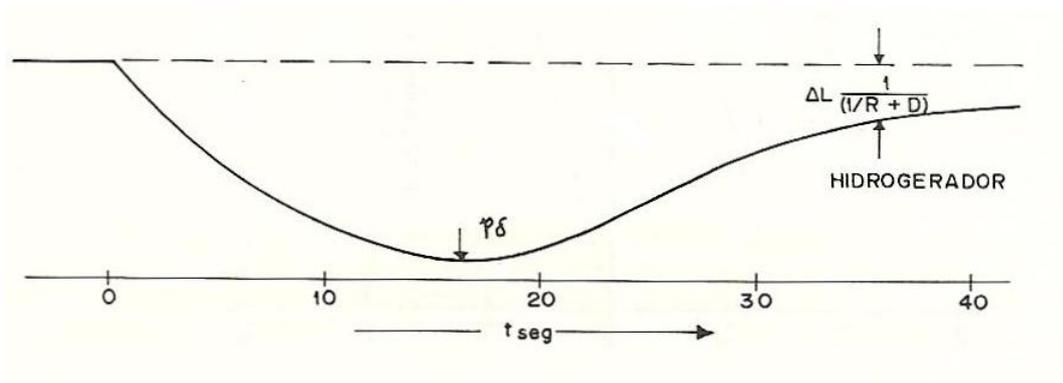
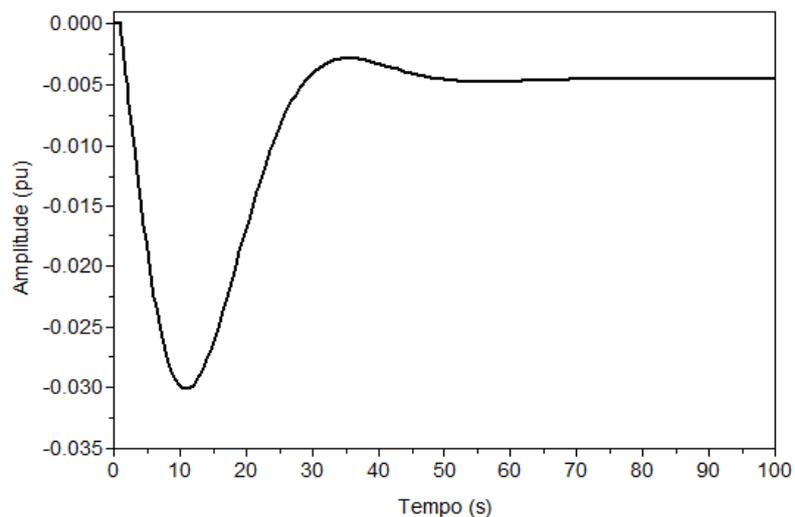


Figura 4.24 – Natureza da resposta do desvio de frequência para uma turbina hidráulica para a mesma variação de carga (acréscimo)

A figura 4.25, mostra a resposta da frequência para uma turbina hidráulica, utilizando o *software ScicosLab*, considerando  $\Delta L = 0,05$  p.u,  $D = 1$  p.u,  $R = 0,1$  p.u.

$$p\delta = \frac{-\Delta L}{\frac{1}{R} + D} = \frac{-0,05}{10 + 1} = -0,0045 \text{ p.u}$$



#### 4.25 - Desvio de frequência $p\delta$ da Turbina hidráulica

A característica típica de carga-frequência do estado de equilíbrio de uma unidade é mostrada na figura 4.26. Quando a unidade não está em paralelo, o ajuste do variador de velocidade apenas muda a velocidade da unidade. Uma vez que esta seja sincronizada ao sistema, o ajuste da referência de velocidade produz variações de cargas e somente efeitos

mínimos na frequência do sistema, na proporção do tamanho da unidade em questão relativa ao sistema de potência.

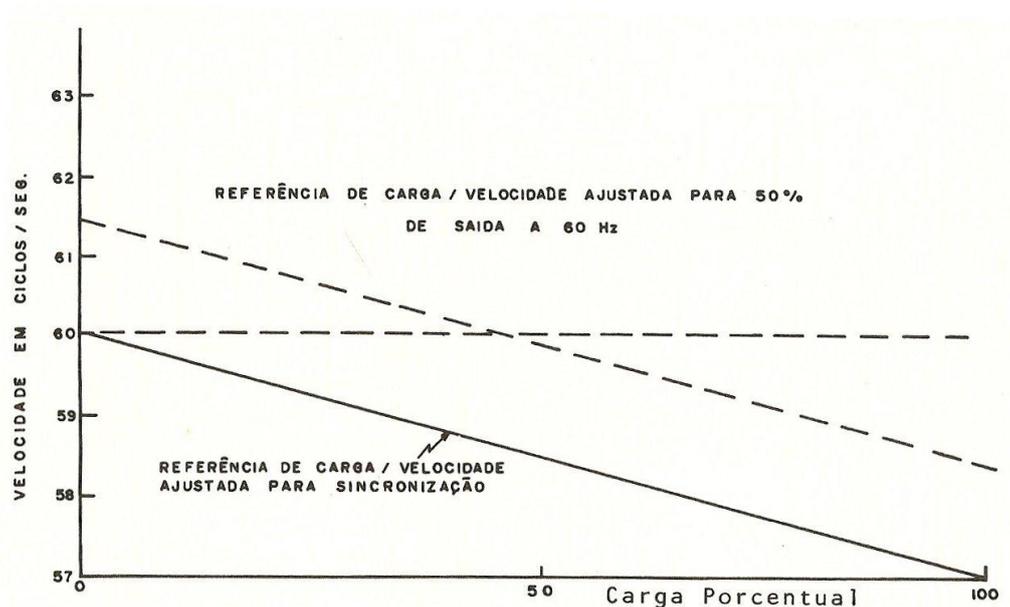


Figura 4.26 - Característica típica de regulação de velocidade de uma máquina

Embora a característica de carga-frequência seja mostrada na figura 4.26 como uma linha reta com inclinação uniforme, na realidade, esta característica é irregular. Esta tem como média a linha reta, mas mostra curvaturas incrementais que vão de 2% a 12%, dependendo da posição da válvula de controle, na faixa de controle. Próximo ao final do deslocamento da válvula, a regulação incremental é alta, enquanto que no início, ou ponto de bloqueio da válvula, a regulação incremental é baixa.

Os modernos sistemas eletro-hidráulicos de controle carga-frequência tentam minimizar estas variações na regulação incremental pela caracterização das válvulas com geradores de função eletrônicos, ou pelo uso da realimentação da pressão do primeiro estágio da turbina.

### 4.5.2 Regulação de Velocidade de Duas Áreas Interligadas

O caso de áreas interligadas não é diferente daquele da área isolada, no que se refere aos efeitos dos reguladores.

A figura 4.27 mostra duas áreas com uma única máquina motriz em cada área (no caso geral, várias máquinas motrizes estariam contribuindo em paralelo em cada área, como mostrado na figura 4.11).

A representação da figura 4.27 considera elasticidade entre as áreas (isto é, suas frequências individuais podem diferir transitoriamente, embora elas tenham que manter o mesmo valor médio se os sistemas permanecerem sincronizados).

O desvio de frequência em regime permanente será o mesmo, independentemente da área na qual a alteração de carga ocorre, e será dado pela equação (4.16):

$$p\delta = \frac{-\Delta L}{\left(\frac{1}{R_1} + D_1\right) + \left(\frac{1}{R_2} + D_2\right)} \quad (4.16)$$

Este resultado pode ser deduzido a partir de uma redução do diagrama de blocos da figura 4.27, ou a partir das equações de estado permanente, a seguir, que podem ser extraídas do mesmo diagrama de blocos.

Serão examinadas agora as alterações de estado de equilíbrio que se seguem a uma alteração de carga ( $\Delta L_1$  ou  $\Delta L_2$ ) em regime permanente.

Neste caso, considera-se  $\Delta L_1$  da área 1.

$$p\delta_1 = p\delta_2 = p\delta \quad (4.17)$$

$$\Delta P_{m1} - \Delta L_1 - \Delta P_{TL12} = p\delta_1 D_1 = p\delta D_1 \quad (4.18)$$

$$\Delta P_{m2} - \Delta L_2 + \Delta P_{TL12} = p\delta_2 D_2 = p\delta D_2 \quad (4.19)$$

$$\Delta P_{m1} = \frac{-p\delta_1}{R_1} = \frac{-p\delta}{R_1} \quad (4.20)$$

$$\Delta P_{m2} = \frac{-p\delta_2}{R_2} = \frac{-p\delta}{R_2} \quad (4.21)$$

Substituindo as equações (4.20) e (4.21) nas equações (4.18) e (4.19) resulta na (4.22) e (4.23) respectivamente:

$$-\frac{p\delta}{R_1} - \Delta L_1 - P_{TL12} = p\delta D_1 \quad (4.22)$$

$$-\frac{p\delta}{R_2} - \Delta L_2 + P_{TL12} = p\delta D_2 \quad (4.23)$$

somando a equação (4.22) a (4.23), obtém-se a equação (4.24):

$$p\delta = \frac{-\Delta L_1 - \Delta L_2}{\left(\frac{1}{R_1} + D_1\right) + \left(\frac{1}{R_2} + D_2\right)} \quad (4.24)$$

Desta forma substituindo a equação (4.24) nas equações (4.22) e (4.23), e resolvendo o sistema de equações, obtém-se a expressão para a variação o fluxo de Potência da linha de interligação, obtendo a equação (4.25):

$$\Delta P_{TL12} = \frac{-\Delta L_1 \left(\frac{1}{R_2} + D_2\right) + \Delta L_2 \left(\frac{1}{R_1} + D_1\right)}{\left(\frac{1}{R_1} + D_1\right) + \left(\frac{1}{R_2} + D_2\right)} \quad (4.25)$$

Além disso, pode-se encontrar as equações que mostram a variação da potência gerada por cada área em função da variação da carga. Sabendo-se que em regime permanente ( $\Delta P_m = \Delta P_G$ ), utilizando as equações (4.20) e (4.21) é possível dizer que:

$$\Delta P_{G1} = \Delta P_{m1} = \frac{-p\delta}{R_1} \quad (4.26)$$

$$\Delta P_{G2} = \Delta P_{m2} = \frac{-p\delta}{R_2} \quad (4.27)$$

substituindo a equação (4.24) nas equações (4.26) e (4.27) obtém-se respectivamente as equações(4.28) e (4.29):

$$\Delta P_{G1} = \frac{\Delta L_1 + \Delta L_2}{R_1 \left[\left(\frac{1}{R_1} + D_1\right) + \left(\frac{1}{R_2} + D_2\right)\right]} \quad (4.28)$$

$$\Delta P_{G2} = \frac{\Delta L_1 + \Delta L_2}{R_2 \left[\left(\frac{1}{R_1} + D_1\right) + \left(\frac{1}{R_2} + D_2\right)\right]} \quad (4.29)$$

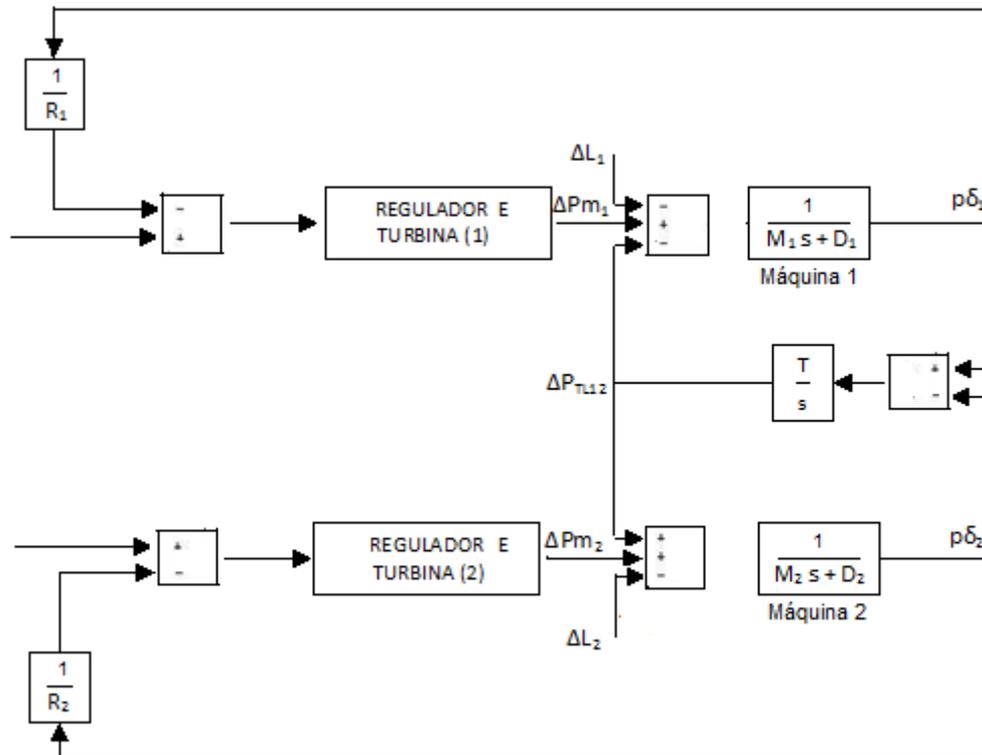


Figura 4.27 – Diagrama de blocos de um sistema interligado com duas áreas com uma única máquina motriz em cada área

Logo as equações (4.24), (4.25), (4.28) e (4.29) representam, o desvio de frequência, a variação do fluxo de potência entre as máquinas e as variações de potência gerada, para uma variação de carga.

Uma análise das equações acima mostra que o desvio de frequência em regime permanente é o mesmo para uma alteração de carga similar na área 2.

A variação da potência da linha de interligação reflete a ação dos reguladores e a contribuição de regulação de uma área para outra.

Estas relações estão listadas na tabela I e formam a base para a operação e filosofia de controles de carga-frequência de sistemas interconectados.

Observa-se, em particular, o sinal da variação de potência da linha de interligação, relativo ao desvio de frequência, como uma informação a partir da qual a localização da variação de carga  $\Delta L$  (seja na área 1 ou na área 2) pode ser deduzida.

Tabela I – Desvio de frequência e variação da potência nas linhas de interligação para uma alteração de carga

Área onde ocorre a variação de carga	Desvio de frequência (pδ)	Desvio nas linhas de interligação	
		Da área 1 para área 2 (Δ P <sub>TL12</sub> )	Da área 2 para área 1 (Δ P <sub>TL21</sub> )
Área 1	$\frac{-\Delta L}{\left(\frac{1}{R_1} + D_1\right) + \left(\frac{1}{R_2} + D_2\right)}$	$\frac{-\Delta L \left(\frac{1}{R_2} + D_2\right)}{\left(\frac{1}{R_1} + D_1\right) + \left(\frac{1}{R_2} + D_2\right)}$	$\frac{+\Delta L \left(\frac{1}{R_2} + D_2\right)}{\left(\frac{1}{R_1} + D_1\right) + \left(\frac{1}{R_2} + D_2\right)}$
Área 2	$\frac{-\Delta L}{\left(\frac{1}{R_1} + D_1\right) + \left(\frac{1}{R_2} + D_2\right)}$	$\frac{+\Delta L \left(\frac{1}{R_1} + D_1\right)}{\left(\frac{1}{R_1} + D_1\right) + \left(\frac{1}{R_2} + D_2\right)}$	$\frac{-\Delta L \left(\frac{1}{R_1} + D_1\right)}{\left(\frac{1}{R_1} + D_1\right) + \left(\frac{1}{R_2} + D_2\right)}$

Verifica-se aí que uma variação de carga ΔL é suprida através dos efeitos de uma variação de frequência agindo sobre os reguladores das máquinas conectadas e agindo sobre a característica de frequência da carga.

$$p\delta = p\delta_1 = p\delta_2 = \frac{-\Delta L_1}{\left(\frac{1}{R_1} + D_1\right) + \left(\frac{1}{R_2} + D_2\right)} \quad (4.30)$$

$$\Delta P_{TL21} = \Delta P_{G2} - \Delta L_2 = -\left(\frac{1}{R_2} + D_2\right)p\delta$$

$$\Delta P_{TL21} = \frac{+\Delta L_1 \left(\frac{1}{R_2} + D_2\right)}{\left(\frac{1}{R_1} + D_1\right) + \left(\frac{1}{R_2} + D_2\right)} \quad (4.31)$$

Apresenta-se o caso de dois sistemas interligados, as figuras 4.28 e 4.29 mostram as variações nas potências, que ocorrem por causa da aplicação de uma variação de carga na área 1. As equações (4.24), (4.25) e (4.26) são deduzidas a partir da variação de carga na análise do desvio de frequência na variação da potência e influencia nos geradores.

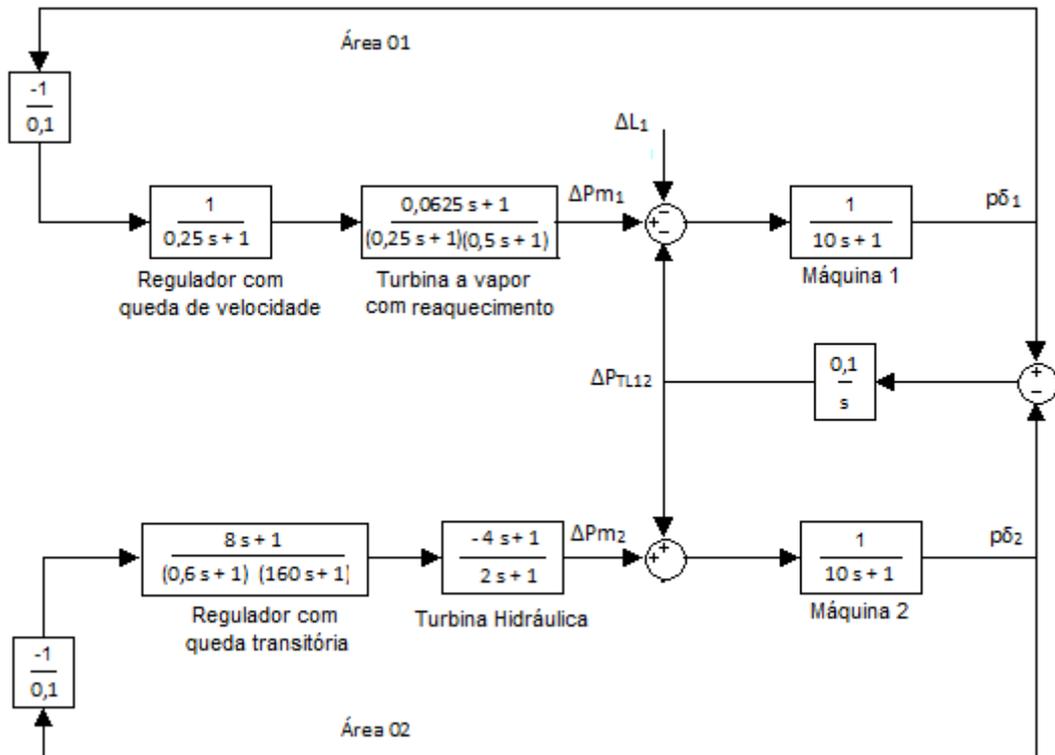


Figura 4.28- Diagrama de blocos convencional de um sistema com duas áreas interligadas

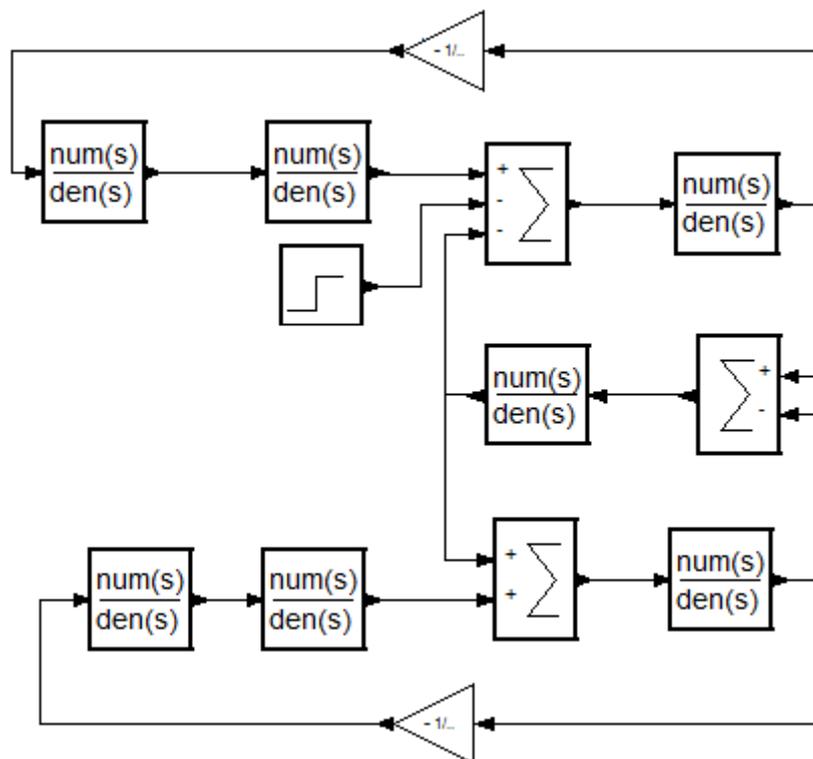


Figura 4.29- Diagrama de blocos do ScicosLab de um sistema com duas áreas interligadas

Os dados utilizados nas simulações a seguir são:

Área 1:-

$M = 10$  s;  $D = 1$  p.u.;  $T_R = 0,25$  s;  $T_G = 0,25$  s;  $T_S = 0,5$  s;  $c = 0,25$  p.u.;  $R = 0,1$  p.u.;  
 $\Delta L = 0,05$  p.u.;

Área 2:-

$M = 10$  s;  $D = 1$  p.u.;  $T_R = 8$  s;  $T_G = 0,6$  s;  $r = 2$  p.u.;  $T_W = 4$  s;  $R = 0,1$  p.u.

A figura 4.30 corresponde a um acréscimo em degrau de carga na área 1 de 5% no instante  $t = 0$  s. As respostas dos desvios de frequências e da variação de potência na linha de interligação são ilustradas nas figuras 4.31 e 4.32, sendo que os valores finais em regime permanente obedecem a seguinte equação:

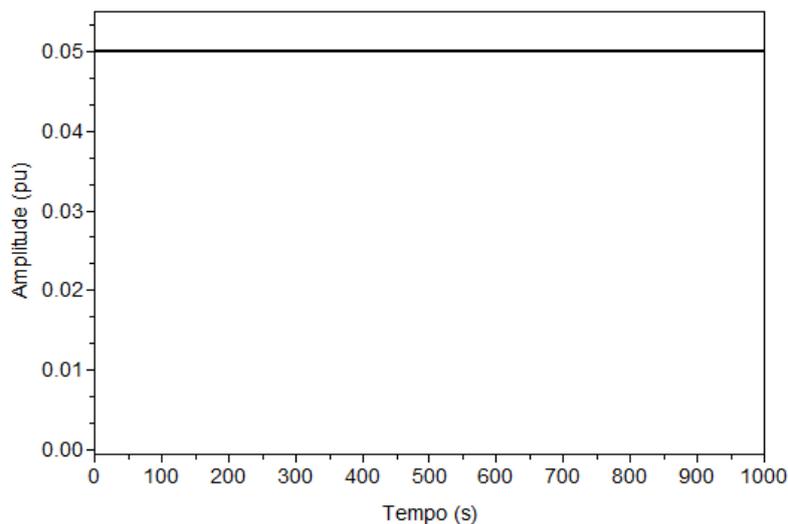


Figura 4.30 - Variação da Carga

As respostas dos desvios de frequências são ilustradas na figura 4.31, sendo que os valores finais em regime permanente obedecem a equação (4.16):

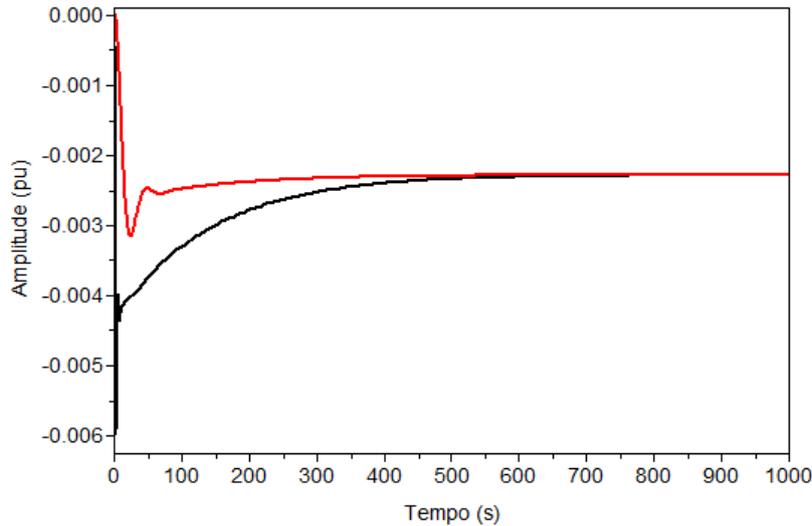


Figura 4.31 – Desvios de frequências  $p\delta_1$  (preto) e  $p\delta_2$  (vermelho)

A figura 4.31 apresenta o comportamento do desvio da frequência na região em regime transitório de duas áreas interligadas, sendo que a área 1 corresponde a Turbina a vapor com reaquecimento e o regulador com queda de velocidade e a área 2 corresponde a Turbina hidráulica e o regulador com queda transitória, sendo a área 1 representando o  $p\delta_1$  (preto) e a área 2 pelo  $p\delta_2$  (vermelho), e na continuidade visualiza-se que em regime permanente, que as mesmas obedecem a equação matemática (4.16):

$$p\delta = p\delta_1 = p\delta_2 = \frac{-\Delta L}{\left(\frac{1}{R_1} + D_1\right) + \left(\frac{1}{R_2} + D_2\right)} = \frac{-0,05}{11 + 11} = -0,00227 \text{ p.u} .$$

Verifica-se que os desvios de frequências da simulação apresentado na figura 4.31 coincide com o valor calculado.

A resposta da variação de potência na linha de interligação e ilustrada na figura 4.32, sendo que o valor final em regime permanente obedece a seguinte equação:

$$\Delta P_{TL12} = \frac{-\Delta L_1 \left(\frac{1}{R_2} + D_2\right)}{\left(\frac{1}{R_1} + D_1\right) + \left(\frac{1}{R_2} + D_2\right)} = \frac{-0,05 (11)}{11 + 11} = -0,025 \text{ p.u}$$

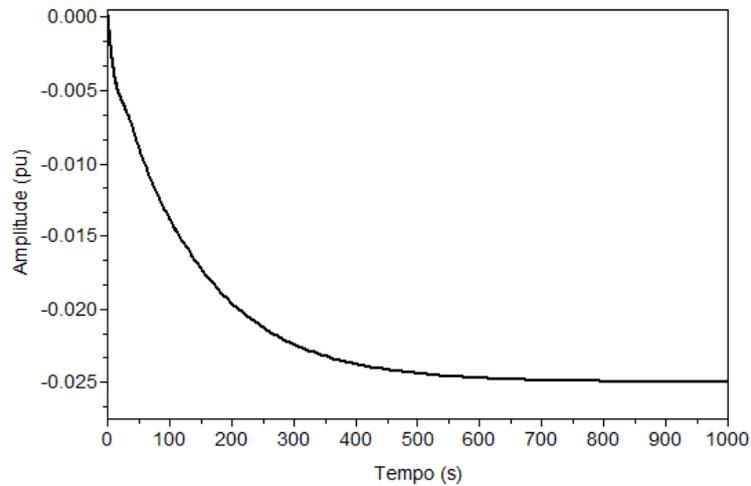


Figura 4.32 - Variação da Potência  $\Delta P_{TL12}$

Verifica-se que a variação da potência na linha de interligação da figura 4.32 coincide com o valor calculado

As respostas nos desvios de geração são ilustradas na figura 4.33, sendo que os valores finais em regime permanente obedecem a seguinte equação:

$$\Delta P_{g1} = \Delta P_{g2} = \frac{\Delta L_1}{R_1 \left[ \left( \frac{1}{R_1} + D_1 \right) + \left( \frac{1}{R_2} + D_2 \right) \right]} = \frac{0,05}{0,1[11 + 11]} = + 0,02272 \text{ p. u}$$

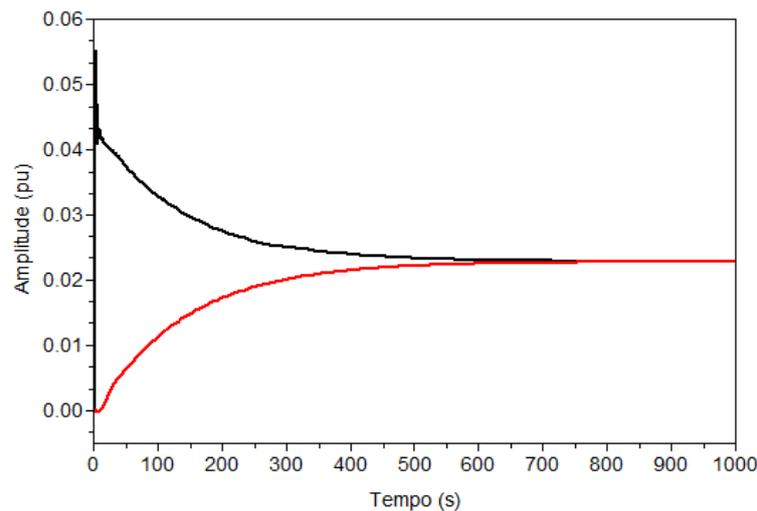


Figura 4.33 Variação da Potência do gerador da área 1 (preto) da área 2 (vermelho)

Novamente, o resultado final da variação da potência dos geradores obtido através da simulação no *ScicosLab* em regime permanente coincide com o valor calculado.

## 4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foi mostrada a eficiência do Software ScicosLab para avaliação do comportamento do controle primário de carga-frequência em regime transitório ou permanente de um sistema de potência isolado e/ou interligado, levando em conta a atuação do regulador de velocidade (ou controle primário).

As equações matemáticas que representam as variações de frequência, potência de linha de interligação e potência gerada puderam ser comprovadas através dos diversos gráficos no decorrer deste capítulo que resultaram da inserção de uma alteração da carga em determinada área.

As figuras 4.14, 4.16 e 4.17 mostram os desvios de frequência ( $p\delta$ ) das Turbinas a vapor sem reaquecimento, com reaquecimento e o resultado da sobreposição dos dois tipos de Turbina com seus respectivos reguladores, mostrando o resultado gráfico entre  $p\delta = -0,0045$  p.u e  $p\delta = -0,005$  p.u em regime permanente.

A figura 4.19 mostra o desvio da frequência da Turbina hidráulica acoplada ao regulador com queda transitória, mostrando o resultado gráfico entre  $p\delta = -0,0033$  p.u e  $p\delta = -0,005$  p.u em regime permanente.

A figura 4.21 permite analisar a natureza da resposta a uma variação de carga (acréscimo) em degrau com regulador de velocidade bloqueado.

Ao interligar duas áreas distintas esta possibilita obter na figura 4.31 resultados dos desvios de frequências, a figura 4.32 a variação da potência na linha de interligação e na figura 4.33 a variação do gerador da área 1 e da área 2

Pode ser observado que o novo estado de regime permanente atingido pelo sistema não correspondeu ao estado inicial como era esperado, visto atuação dos reguladores.

As figuras obtidas através da simulação no *ScicosLab* coincide com os valores calculados, mostrando a eficiência do *software*.

No sentido de recuperar os valores originais de regime permanente deverá ser utilizado um controle adicional mais conhecido como controle secundário, controle suplementar ou controle automático de geração. Isto é objeto do próximo capítulo.

## Capítulo V

# CONTROLE AUTOMÁTICO DA GERAÇÃO OU CONTROLE SUPLEMENTAR

### 5.1 INTRODUÇÃO

O estudo desenvolvido até aqui de diagramas de blocos e suas relações, tanto dinâmicas quando de estado permanente, mostrou que há dois métodos de controle para variar a potência da máquina motriz. Um deles é por meio do regulador ou controle primário de velocidade. O outro é por meio das variações na referência de carga ou mecanismo de regulação.

Em operação normal, os desvios de frequência são mínimos e o mecanismo básico para controlar a potência da máquina motriz, devido á variação da carga em uma determinada área, se faz ajustando o mecanismo de referência da carga, sendo esta ação denominada de “controle primário” [06].

Do ponto de vista de uma dada unidade individual sincronizada a um sistema de potência de valor elevado em relação ao tamanho da unidade, as alterações na referência de carga têm pouco efeito na frequência do sistema, mas resultam em variações da potência mecânica e, portanto, da potência elétrica fornecida pela unidade. Estas variações da potência elétrica, por outro lado, refletem em alterações no fluxo de carga através do sistema de transmissão.

A regulação primária é responsável pelo equilíbrio entre a carga e a geração em uma determinada área de controle. A utilização de reguladores de velocidade com queda, junto às turbinas desta área causa um erro de frequência em regime permanente, quando da ocorrência de impactos de carga de pequena amplitude, assim, a frequência do sistema se estabiliza em um valor diferente da frequência anterior ao impacto. Os erros de frequência em regime permanentes são agravados para os casos de impactos severos de carga, sendo que desta

forma, a ação exclusiva dos reguladores de velocidade poderia levar o sistema a operar com níveis inaceitáveis de frequência. No sentido de recuperar o valor original da frequência do sistema, é utilizado um controle de característica isócrona [10], também conhecida como “controle suplementar” ou “controle secundário” ou “controle automático de geração.

O controle de geração, em uma dada área, tem os seguintes objetivos [03]:

- a) Adaptar as modificações da geração na área com as alterações de carga da área;
- b) Distribuir estas alterações entre os geradores, de modo a minimizar os custos operacionais.

A busca do primeiro destes objetivos é conhecida como “controle suplementar”, que será tratado a seguir. Quando se acrescenta o segundo objetivo, tem-se o “controle suplementar com distribuição econômica”.

### **5.2 CONTROLE SUPLEMENTAR EM SISTEMAS DE POTÊNCIA ISOLADOS**

Em um sistema de potência isolado, um desequilíbrio entre a potência da máquina motriz e cargas conectadas, resulta em um desvio de frequência de intensidade suficiente para a busca do restabelecimento do equilíbrio entre as potências elétrica e mecânica.

O desvio de frequência é, portanto, uma indicação direta do desequilíbrio e a recondução deste desvio para zero, através do controle suplementar, preenche o objetivo da adequação da geração à carga.

A figura 5.1 apresenta o diagrama de blocos de um sistema de potência isolado, com ação do controle suplementar, onde para fins ilustrativos, é mostrada uma geração de vapor com reaquecimento e a regulação com queda de velocidade.

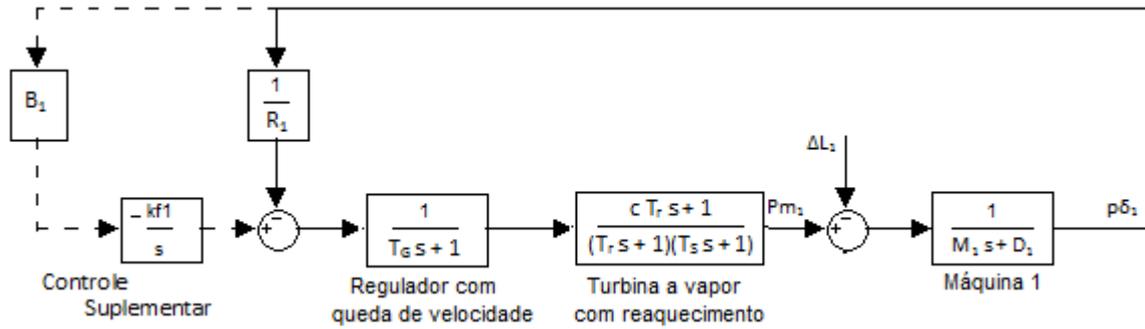


Figura 5.1 – Diagrama de blocos de um sistema de potência isolado (unidade a vapor com reaquecimento) identificando a ação de controle suplementar

A figura 5.2 apresenta o diagrama de blocos de um sistema de potência isolado, com ação de controle suplementar, novamente para fins ilustrativos é mostrada uma geração hidráulica tendo o regulador de velocidade com queda transitória

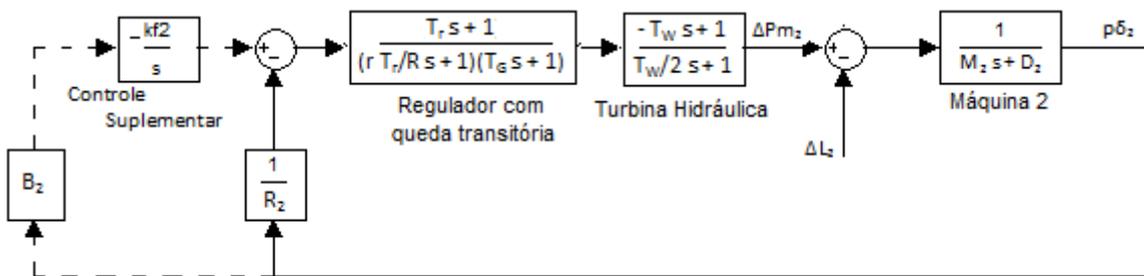


Figura 5.2 – Diagrama de blocos de um sistema de potência isolado (unidade hidráulica) identificando a ação de controle suplementar

A ação de restauração, ou ação integral do controle suplementar, garante erro de frequência zero no estado de equilíbrio.

O ganho da ação integral no controle suplementar é limitado por considerações de estabilidade do controle. Algumas vezes acrescenta-se uma ação proporcional para aumentar a estabilidade do controle suplementar ou para permitir uma ação mais rápida através deste controle.

A figura 5.3 mostra o comportamento da frequência em uma área isolada típica, sem e com controle suplementar, seguindo a uma variação em degrau na carga.

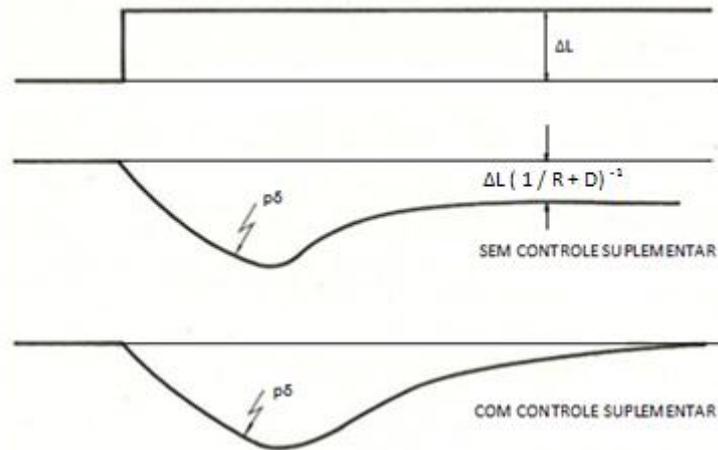


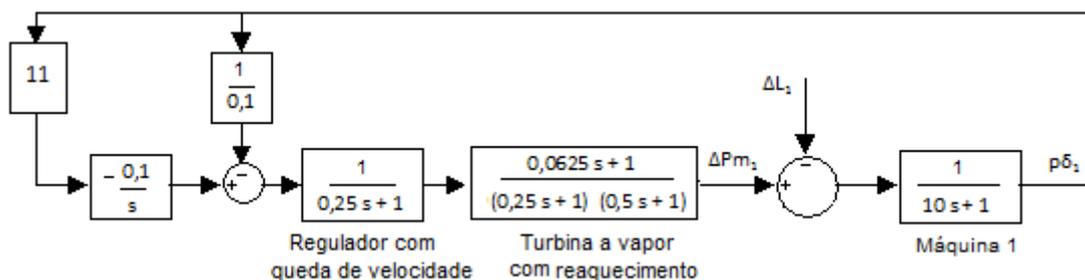
Figura 5.3 – Comportamento da frequência em uma área isolada típica – sem e com controle suplementar – seguindo a uma variação em degrau na carga

A figura (a) representa o diagrama de blocos convencional, pois neste, apresenta de forma visível os valores adotados para a simulação:

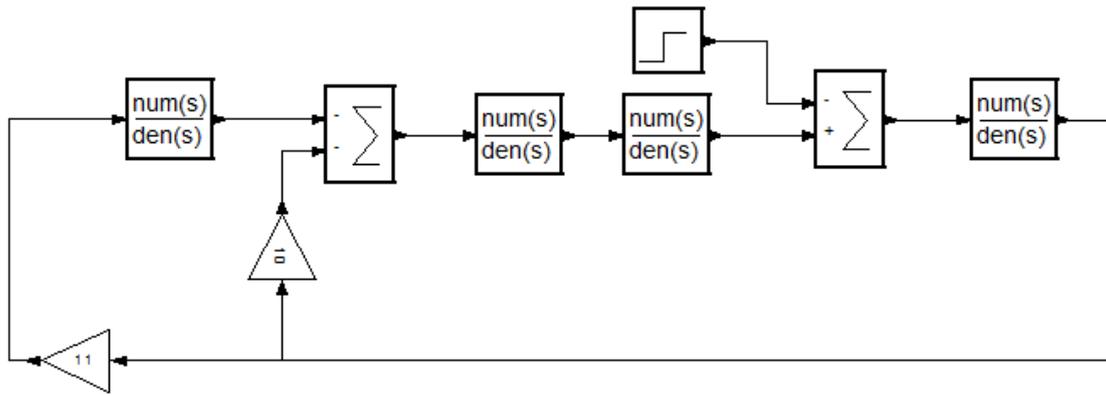
$M = 10 \text{ s}$ ;  $D = 1 \text{ p.u.}$ ;  $R = 0,1 \text{ p.u.}$ ;  $\Delta L = 0,05 \text{ p.u.}$ ;  $B = 11 \text{ p.u.}$ ;  $K = 0,1 \text{ p.u.}$ ;  $T_G = 0,25 \text{ s}$ ;  $T_R = 0,25 \text{ s}$ ;  $T_S = 0,25 \text{ s}$ ;  $c = 0,25 \text{ p.u.}$

A figura (b) apresenta o diagrama de blocos no formato visual do *ScicosLab*, para a simulação.

As figura (a), (b) compõem a figura 5.4 onde temos o Diagrama de blocos da Turbina à vapor com reaquecimento associada ao controle suplementar.



(a) - Diagrama de blocos convencional



(b) – Representação no *ScicosLab*

Figura 5.4 – Diagrama de blocos da Turbina a vapor com reauecimento e controle suplementar.

A seguir, apresenta-se na figura 5.5 a variação em degrau da carga, resultado obtido através da simulação no *ScicosLab* na configuração da figura 5.4.

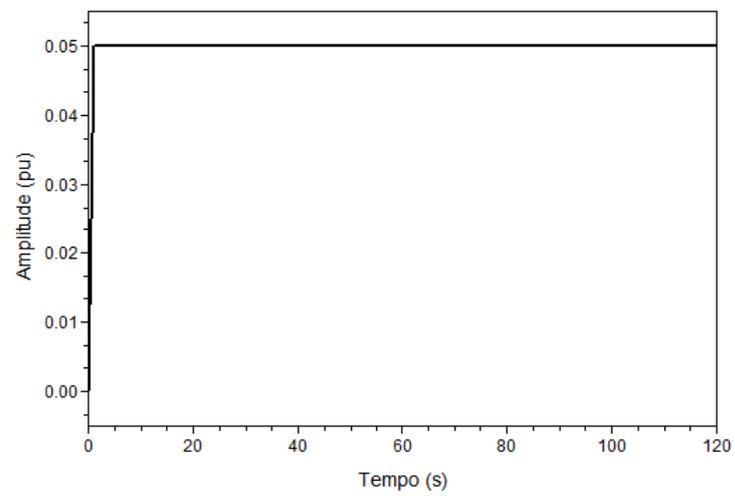


Figura 5.5 – Variação em degrau da carga.

Observa-se que a figura 5.5, mostra a variação em degrau da carga  $\Delta L = 0,05$  p.u.

Na figura 5.6 apresenta o desvio de frequências ( $p\delta$ ) da turbina a vapor com reauecimento, considerando a situação sem / com controle suplementar.

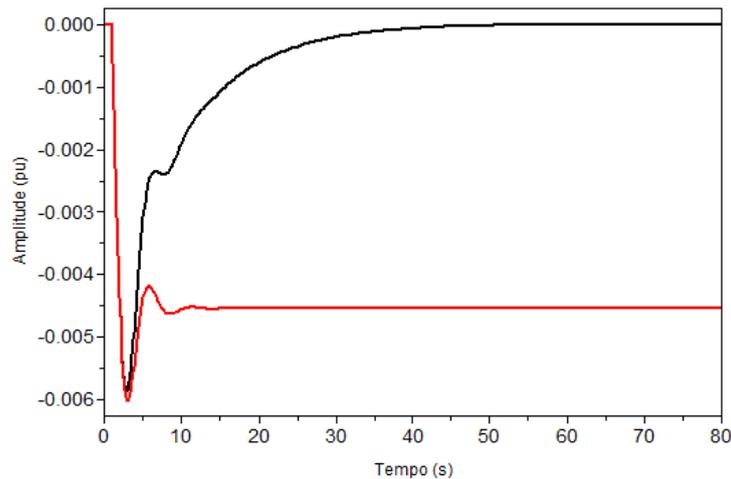


Figura 5.6 – Comportamento da frequência em uma área isolada (unidade a vapor com reaquecimento) – controle primário (vermelho) e controle suplementar (preto)

A resposta final para a frequência em regime permanente para a turbina a vapor, obedecem as seguintes expressões e resultados:

$$p\delta = \frac{-\Delta L}{\left(\frac{1}{R} + D\right)} = -\frac{0,05}{(10 + 1)} = -0,0045 \text{ p.u.} \quad (\text{com controle primário})$$

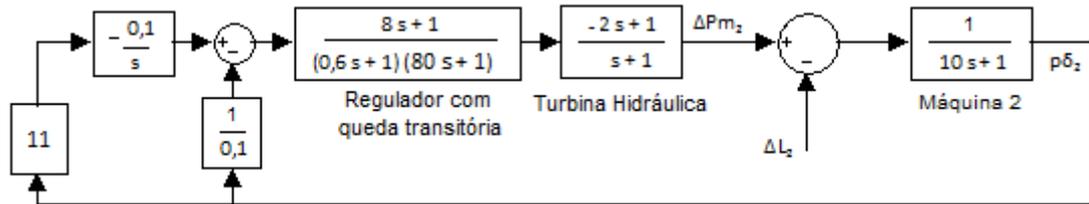
$$p\delta = 0 \quad (\text{com controle suplementar})$$

A figura (a) representa o diagrama de blocos convencional, pois neste, apresenta de forma visível os valores adotados para a simulação:

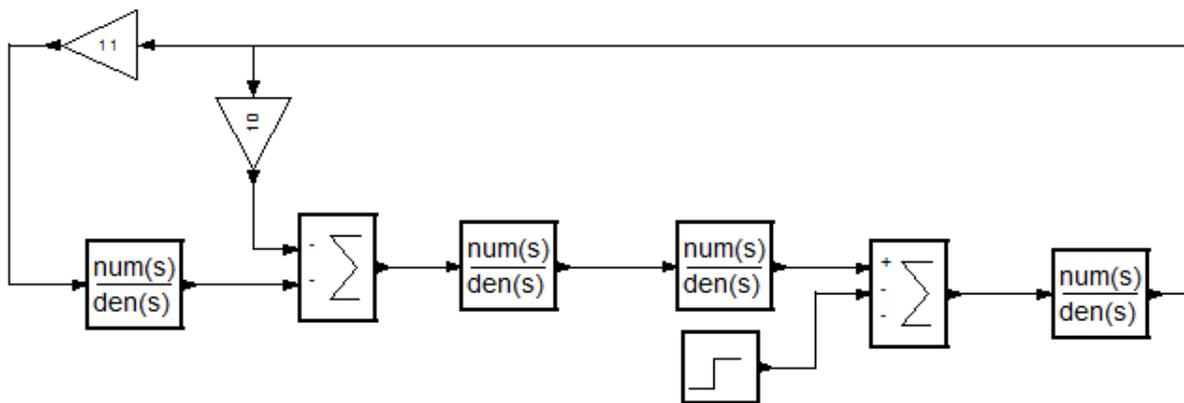
$M = 10 \text{ s}$ ;  $D = 1 \text{ p.u.}$ ;  $R = 0,1 \text{ p.u.}$ ;  $\Delta L = 0,05 \text{ p.u.}$ ;  $B = 11 \text{ p.u.}$ ;  $K = 0,1 \text{ s/rad}$ ;  $T_G = 0,6 \text{ s}$ ;  $T_R = 8 \text{ s}$ ;  $T_W = 2 \text{ s}$ ;  $r = 1 \text{ p.u.}$

A figura (b) apresenta o diagrama de blocos no formato visual do *ScicosLab*, para a simulação.

As figura (a), (b) compõem a figura 5.7 onde temos o Diagrama de blocos da Turbina hidráulica associada ao regulador com queda transitória e o controle suplementar.



(a) - Diagrama de blocos convencional



(b) – Representação no *ScicosLab*

Figura 5.7 – Diagrama de blocos da Turbina hidráulica com controle suplementar.

A condição final de regime permanente pode ser constatada pelas equações:

$$p\delta = \frac{-\Delta L}{\left(\frac{1}{R} + D\right)} = -\frac{0,05}{(10 + 1)} = -0,0045 \text{ p.u} \quad (\text{com controle primário})$$

$$p\delta = 0 \quad (\text{com controle suplementar})$$

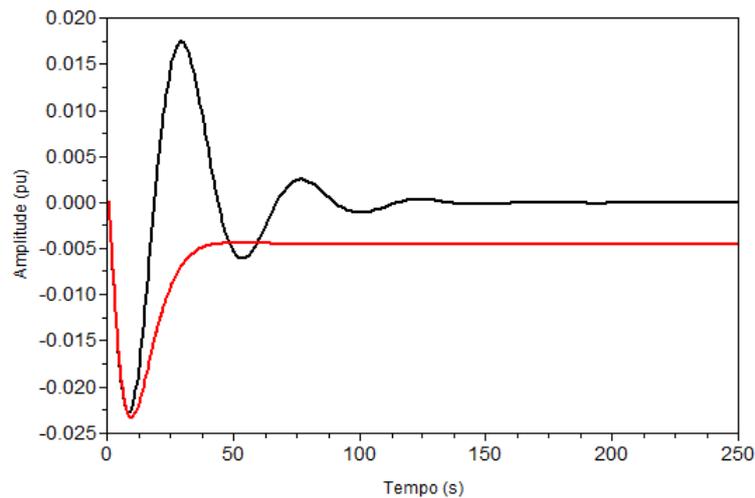


Figura 5.8 – Comportamento da frequência em uma área isolada (unidade hidráulica) – controle primário (vermelho) e controle suplementar (preto)

Evidentemente que, quanto mais lenta for a resposta da frequência de todo o sistema a uma variação na referência de carga, mais lenta deve ser a ação do controle suplementar para haver estabilidade, observação estas vistas nas figuras 5.6 e 5.8, respectivamente as unidades a vapor com reaquecimento e a hidráulica.

Em um sistema de potência isolado, um desequilíbrio entre a potência da máquina motriz e cargas conectadas resulta em desvio de frequência de intensidade suficiente para levar a um novo equilíbrio entre a potência gerada e a carga. A recondução do desvio de frequência para zero, é obtido através do controle suplementar, preenchendo o objetivo da adaptação da geração à carga.

Desta forma, um controle com a finalidade de atender a estratégia de erro nulo de frequência, em um regime permanente, deve ser do tipo integral, devendo ter como sinal de entrada o erro ou desvio de frequência e como saída o sinal adicional na referência do regulador de velocidade.

### 5.3 CONTROLE SUPLEMENTAR EM SISTEMAS DE POTÊNCIA INTERLIGADOS

Conforme discutido nas seções anteriores, um desequilíbrio entre carga e geração em sistemas interconectados resulta em variação nos fluxos de potência nas linhas de interligação e na frequência.

No caso usual de áreas interligadas que são partes de um grande sistema fornecedor de energia elétrica, os desvios de frequência são muito pequenos, e o efeito básico de uma variação de carga em uma área é sentido como uma variação no fluxo de potência da linha de interligação entre a área e os sistemas vizinhos.

Tendo em vista o objetivo básico do controle suplementar, que é a restauração do equilíbrio entre as variações de carga e as variações de geração da área, ele é alcançado quando a ação de controle levar novamente o desvio de frequência e o desvio da potência da linha de interligação a zero.

Um exame da Tabela I do capítulo IV e um pouco de raciocínio heurístico, com objetivo de atingir a não interação entre as ações de controle nas áreas interconectadas, levam ao conceito de “**Erro de Controle de Área**” ou **ECA**, que é resultado do desvio de potência da linha de interconexão somado ao produto do desvio de frequência por um peso.

Este conceito, também conhecido como “Controle de Carga-Frequência Ponderado”, é baseado nos seguintes objetivos [05]:

- a) O controle suplementar, em uma dada área, deveria corrigir apenas variações de carga naquela área;
- b) O controle suplementar não deveria ocasionar variações do suprimento de carga nas outras áreas, excedendo a contribuição que é feito em virtude do desvio de frequência, através de sua característica de regulação de área;

De fato, é desejável que, se a alteração de carga ocorrer na área 1, não haja ação do controle suplementar na área 2, mas apenas na área 1.

A partir dos valores listados na Tabela I do capítulo IV, observa-se que uma variação de carga da área 1 resulta em um desvio de frequência, dada pela equação (4.24):

Considerando  $\Delta L_1 = \Delta L$  e  $\Delta L_2 = 0$  na equação (4.24)

$$p\delta = - \frac{\Delta L}{\left(\frac{1}{R_1} + D_1\right) + \left(\frac{1}{R_2} + D_2\right)} \quad (5.1)$$

A variação de carga da área 1 resulta em uma variação de potência na linha de interligação das áreas 1 e 2, dada pela equação (4.25):

Considerando  $\Delta L_1 = \Delta L$  e  $\Delta L_2 = 0$  na equação (4.25)

$$\Delta P_{TL12} = - \frac{\Delta L \left(\frac{1}{R_2} + D_2\right)}{\left(\frac{1}{R_1} + D_1\right) + \left(\frac{1}{R_2} + D_2\right)} \quad (5.2)$$

Do ponto de vista da área 2, essa variação de carga na área 1 resulta num desvio de frequência dada pela equação (4.30):

Considerando  $\Delta L_1 = \Delta L$  e  $\Delta L_2 = 0$  na equação (4.30)

$$p\delta = - \frac{\Delta L}{\left(\frac{1}{R_1} + D_1\right) + \left(\frac{1}{R_2} + D_2\right)} \quad (5.3)$$

A variação na potência da linha de interligação é oposta à variação vista da área 1, isto é dada pela equação (4.31):

Considerando  $\Delta L_1 = \Delta L$  e  $\Delta L_2 = 0$  na equação (4.31)

$$\Delta P_{TL21} = + \frac{\Delta L \left(\frac{1}{R_2} + D_2\right)}{\left(\frac{1}{R_1} + D_1\right) + \left(\frac{1}{R_2} + D_2\right)} \quad (5.4)$$

Dessas equações, pode-se concluir que, com o uso de um peso ou fator de inclinação  $(1/R_2 + D_2)$  no desvio da frequência para a área 2, pode-se formar um sinal de controle suplementar conhecido como Erro de Controle de Área (ECA), somando a variação da potência da linha de interligação ao produto do fator de inclinação pelo desvio da frequência.

Assim, para a área 2, este ECA seria:

$$ECA = \Delta P_{TL12} + B_2 p\delta \quad (5.5)$$

com

$$B_2 = \frac{1}{R_2} + D_2 \quad (ECA = 0, \text{variação de carga na área 1}) \quad (5.6)$$

Entretanto, para a área 1, o ECA é:

$$ECA = \Delta P_{TL12} + B_1 p\delta \quad (5.7)$$

com

$$B_1 = \frac{1}{R_1} + D_1 \quad (\text{Isto resultaria } ECA = -\Delta L) \quad (5.8)$$

Portanto, verifica-se que o sinal de erro composto, resultado da soma da variação da potência da linha de interligação com o produto de um fator de inclinação igual à característica de regulação ( $1/R + D$ ) da área, pela variação da frequência, contém a informação exata sobre qual área deveria exercer o esforço de controle suplementar.

Embora este conceito seja baseado nas relações de estados de equilíbrio do comportamento do sistema sob ação dos reguladores, vários estudos dinâmicos realizados confirmaram que o uso de um fator de inclinação próximo à característica de regulação de estado de equilíbrio da área fornece um controle próximo ao ótimo, sob o ponto de vista da não-interação dinâmica entre as áreas.

A figura 5.9 mostra o diagrama de blocos de duas áreas com controle suplementar. Deve-se notar que as considerações de regime permanente mostram que não é crítico o fato de se ter os fatores de inclinação ajustados iguais à característica de regulação.

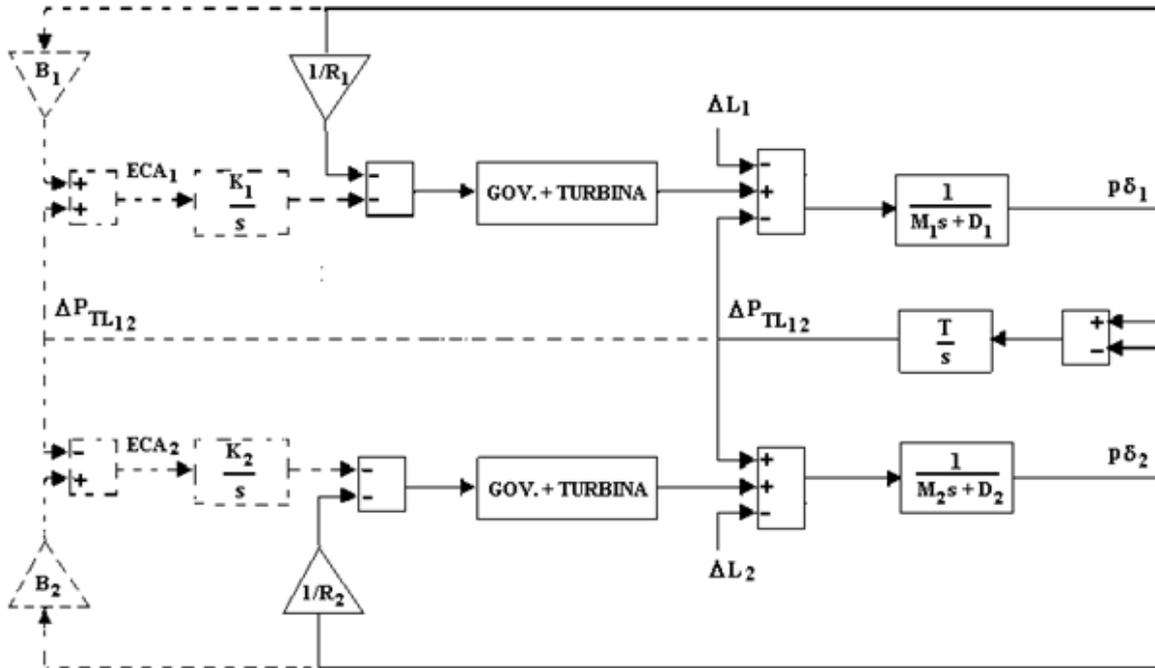


Figura 5.9 – Diagrama de blocos de 2 áreas (com controle suplementarem tracejado)

De fato, para obter o resultado final  $\Delta P_{TL} = 0$  e  $p\delta = 0$ , quase todas as combinações de Erro de Controle de Área, que contenham componentes de desvio de frequência e de variação da potência da linha de interligação, assegurarão a restauração final dos valores destes componentes a zero. Isto é evidente a partir do fato de que a ação integral garante a redução do ECA a zero.

$$ECA_1 = k_1 \Delta P_{TL12} + B_1 p\delta = 0 \quad (5.9)$$

$$ECA_2 = k_2 \Delta P_{TL21} + B_2 p\delta = 0 \quad (5.10)$$

Assim, para valores não-nulos de  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $B_1$  e  $B_2$ , com  $k_1 B_2 \neq k_2 B_1$ , as equações (5.9) e (5.10) conduzirão a  $\Delta P_{TL} = 0$  e  $p\delta = 0$ , independentemente dos valores destas constantes.

Um modo de controle, que também satisfará aos objetivos de ter-se  $\Delta P_{TL} = 0$  e  $p\delta = 0$ , é destinar uma área para controlar os desvios de interligação, chamado de “Controle de Linha de Interligação” (ou TLB do inglês “Tie Line Bias”) e outra área para controlar a frequência,

chamada de “Controle Plano de Frequência“ (ou FF do inglês “*Flat Frequency*”) [03]. Em tal controle ter-se-á:

$$ECA_1 = B_1 p\delta = 0 \quad (5.11)$$

$$ECA_2 = B_2 p\delta = 0 \quad (5.12)$$

Em geral, este modelo de controle, dado pelas equações (5.11) e (5.12), resulta num comportamento dinâmico menos eficiente do que no modo misto com fator de inclinação no desvio de frequência.

A seguir, simula-se através do *ScicosLab* uma variação de carga na área 1 ( $\Delta L = 0,05$  p.u) com a área 2 interligada por uma linha de transmissão, conforme o diagrama de blocos da figura 5.9. Em primeira instância será considerada apenas a regulação primária (controle suplementar bloqueado).

Na figura 5.9, a área 1 é constituído pela turbina a vapor com reaquecimento e seu regulador e a área 2 pela turbina hidráulica e seu regulador. O controle suplementar está inativo neste instante.

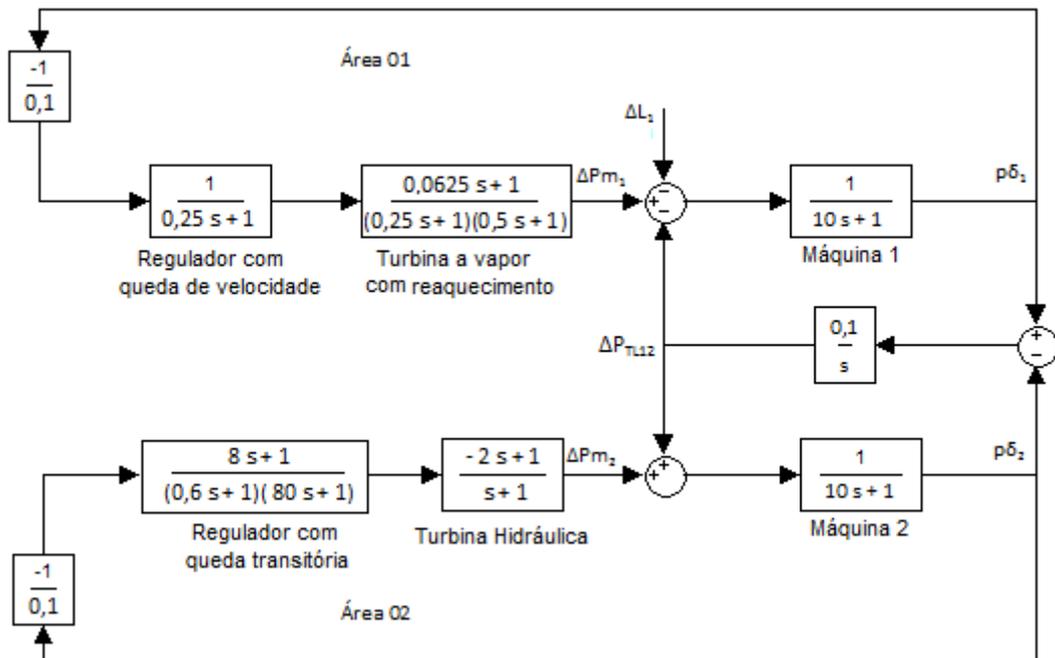
Área 1 –

$M = 10$  s;  $D = 1$  p.u;  $T_R = 0,25$  s;  $T_G = 0,25$  s;  $T_S = 0,5$  s;  $c = 0,25$  p.u;  $R = 0,1$  p.u;  $\Delta L = 0,05$  p.u.

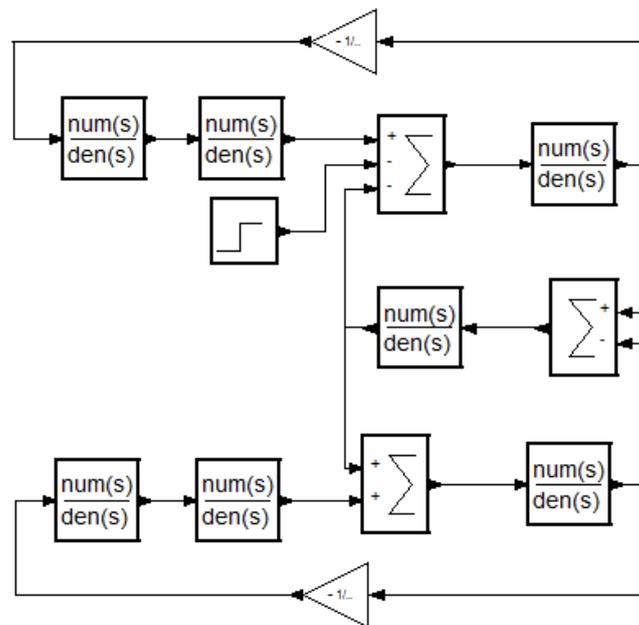
Área 2 –

$M = 10$  s;  $D = 1$  p.u;  $T_r = 8$  s;  $T_G = 0,6$  s;  $r = 0,25$  p.u;  $T_w = 4$  s;  $R = 0,1$  p.u.

A figura 5.10 corresponde a um acréscimo em degrau de carga na área 1 de 5% no instante  $t = 0$  s ou seja  $\Delta L = + 0,05$  p.u.



a- Diagrama de blocos convencional



b- Diagrama de blocos do ScicosLab

Figura 5.10 - Diagrama de blocos de duas áreas sem controle suplementar

As respostas dos desvios de frequências são ilustradas na figura 5.11 e o valor final em regime permanente é obtido através da equação (5.1):

$$p\delta = p\delta_1 = p\delta_2 = -\frac{0,05}{(10 + 1) + (10 + 1)} = -0,00227 \text{ p.u}$$

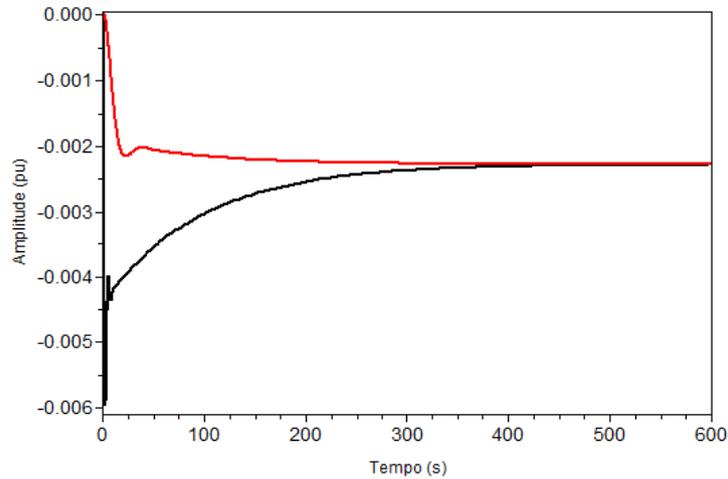


Figura 5.11 – Desvio de frequência  $p\delta$  onde  $p\delta_1$ (preto) e  $p\delta_2$  (vermelho)

Observa-se pela simulação no ScicosLab a resposta do desvio de frequência encontra-se entre  $-0,0020 \text{ p.u}$  e  $-0,0025 \text{ p.u}$  e que o valor calculado é igual a  $-0,00227 \text{ p.u}$ .

A resposta da variação de potência na linha de interligação é ilustrada na figura 5.12, com o valor obtido por meio da equação (5.2):

$$\Delta P_{TL12} = -\frac{0,05(10 + 1)}{(10 + 1) + (10 + 1)} = -0,025 \text{ p.u}$$

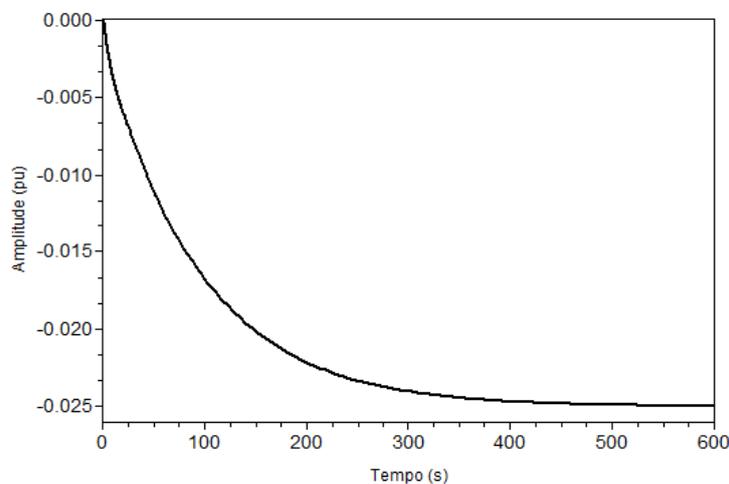


Figura 5.12 – Variação da Potência na linha de interligação  $\Delta P_{TL12}$

Pode-se comprovar o valor final em regime permanente foi atingido pela curva da figura 5.12, assim a simulação com o *ScicosLab* mostrou ser eficiente.

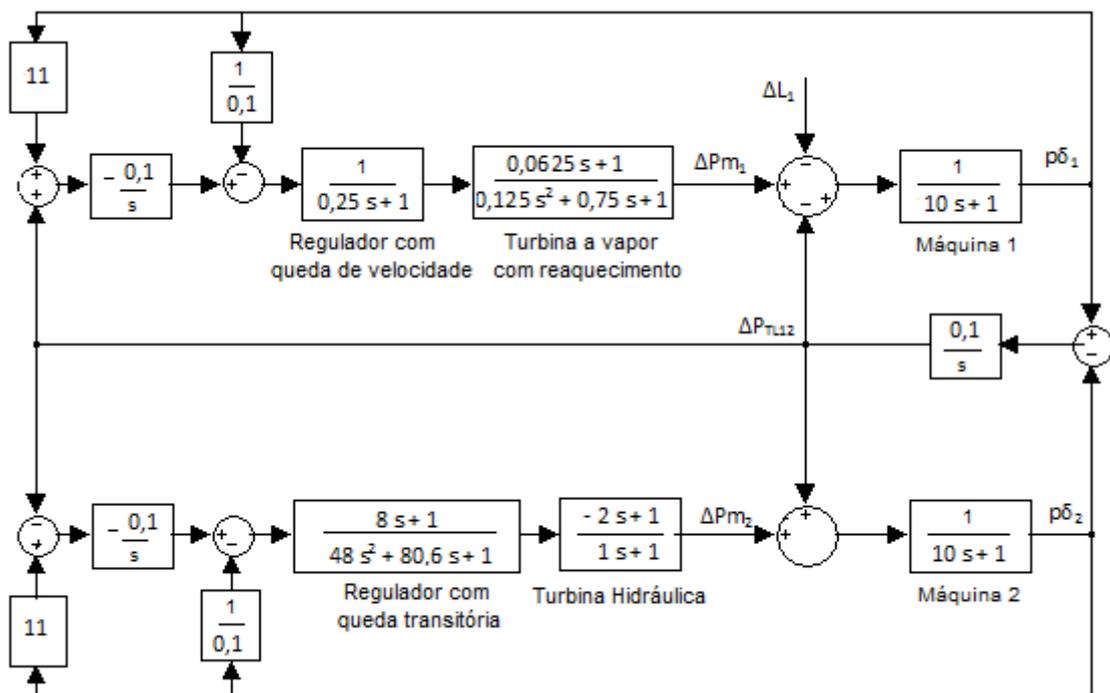
Prosseguindo na análise do Controle Automático da Geração, a figura 5.13, representa o diagrama de blocos de uma turbina a vapor com reaquecimento e seu regulador e a turbina hidráulica e seu regulador, com Controle Suplementar.

Área 1 –

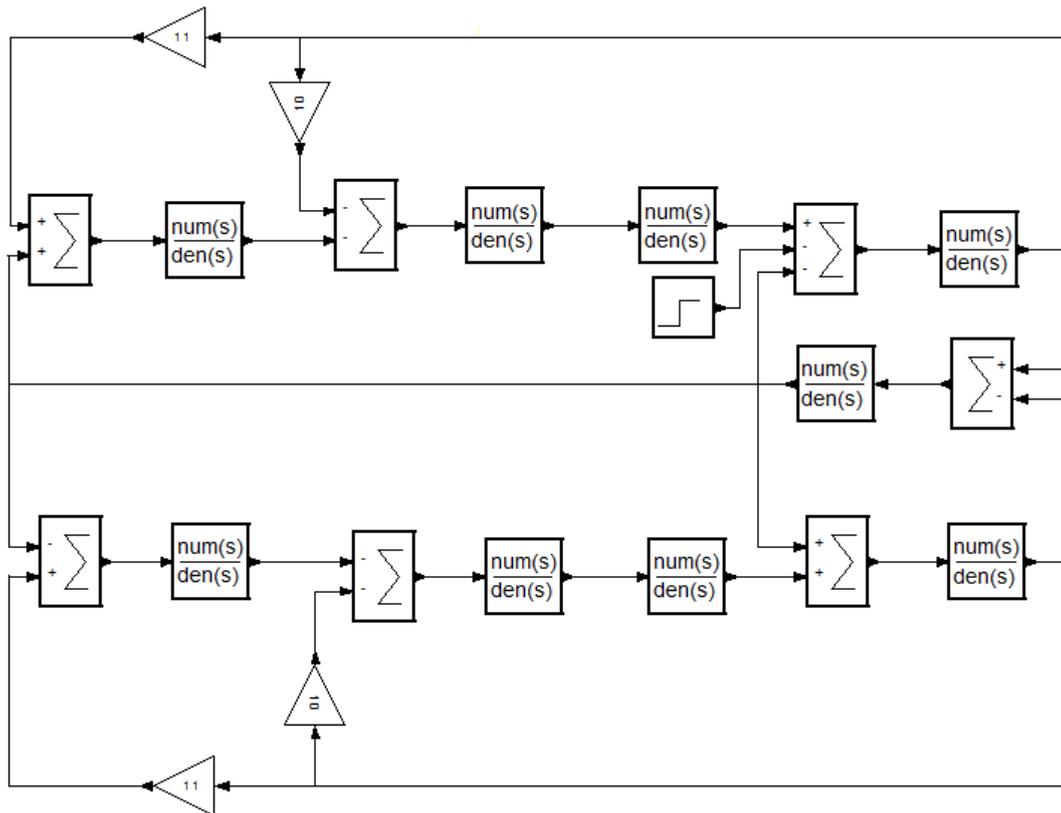
$M = 10 \text{ s}$ ;  $D = 1 \text{ p.u.}$ ;  $T_R = 0,25 \text{ s}$ ;  $T_G = 0,25 \text{ s}$ ;  $T_S = 0,5 \text{ s}$ ;  $c = 0,25 \text{ p.u.}$ ;  $R = 0,1 \text{ p.u.}$ ;  $B_1 = 11 \text{ p.u.}$  e  $\Delta L = 0,05 \text{ p.u.}$

Área 2 –

$M = 10 \text{ s}$ ;  $D = 1 \text{ p.u.}$ ;  $T_r = 8 \text{ s}$ ;  $T_G = 0,6 \text{ s}$ ;  $r = 0,25 \text{ p.u.}$ ;  $T_w = 4 \text{ s}$ ;  $R = 0,1 \text{ p.u.}$  e  $B_2 = 11 \text{ p.u.}$



a - Diagrama de blocos convencional



b – Diagrama de blocos do ScicosLab

Figura 5.13 - Diagrama de blocos de duas áreas com controle suplementar.

Este é o caso mais completo, uma vez que são analisados os efeitos da perturbação inicialmente ocorrida na área 1 ( $\Delta L = 0,05$  p.u) representada por uma turbina a vapor com reaquecimento que é interligada com a área 2, que é constituída por uma turbina hidráulica, numa situação em que ambas áreas possuem o controle suplementar.

As figuras 5.14, 5.15 apresentam os resultados gráficos da simulação através do ScicosLab dos desvios de frequências da área 1 e da área 2, respectivamente.

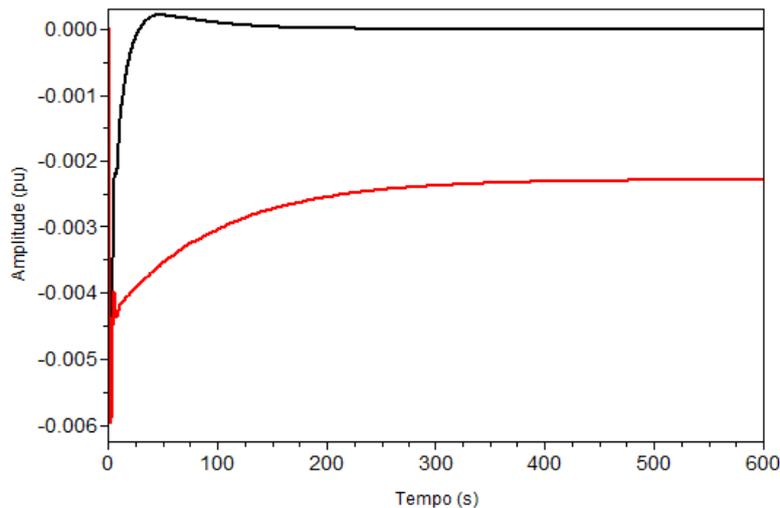


Figura 5.14 – Variação da frequência  $p\delta_1$  com controle suplementar (preto), sem controle suplementar (vermelho)

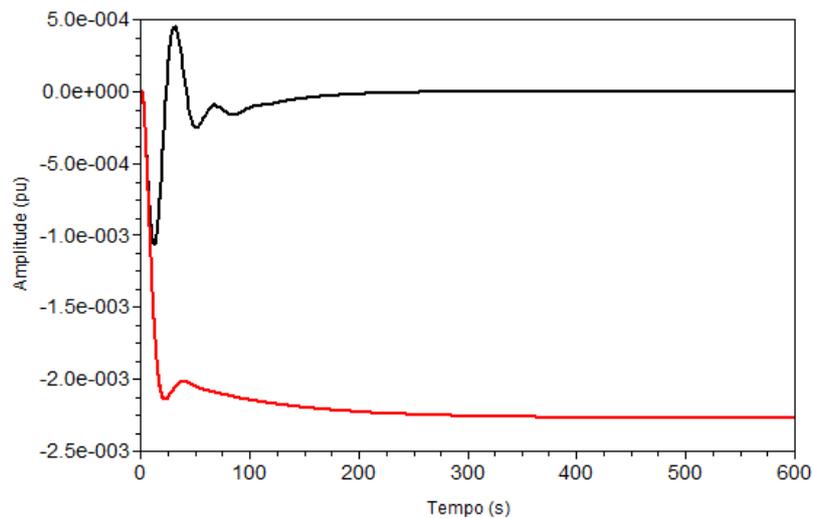


Figura 5.15 – Variação da frequência  $p\delta_2$  com controle suplementar (preto), sem controle suplementar (vermelho)

As figuras 5.14 e 5.15 apresentam separadamente os desvios de frequências sem controle suplementar (vermelho)  $p\delta_1$  e  $p\delta_2$  sendo os mesmos apresentado na figura 5.11, pois utilizou-se os mesmos valores para a geração. Ainda podemos comprovar a ação do controle suplementar (preto) nas mesmas figuras 5.14 e 5.15, levando os desvios de frequências a zero.

A figura 5.16 apresentam os resultados gráficos da simulação através do ScicosLab da variação da potência na linha de interligação da área 1 e área 2.

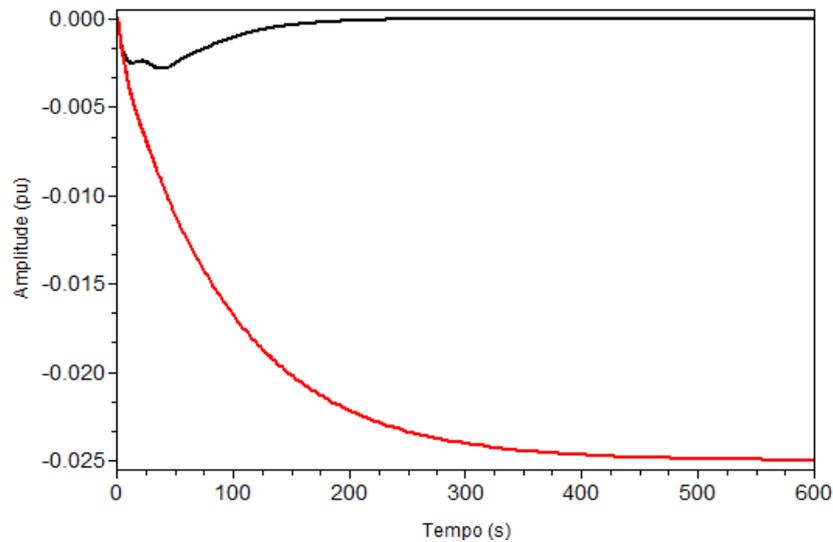


Figura 5.16 – Variação da potência de interligação  $\Delta P_{TL12}$ , com controle suplementar (preto), sem controle suplementar (vermelho)

Da mesma forma ao adicionar o Controle Suplementar ao sistema observa-se que a variação da Potência  $\Delta P_{TL12}$  (preto), tende a zero e sem o Controle Suplementar  $\Delta P_{TL12} = 0,025$  p.u (vermelho), representação conforme figura 5.12.

O resultado final  $\Delta P_{TL12} = 0$  e  $p\delta = 0$  e todas as combinações de Erro de Controle de Área (ECA), em que contenham componentes de desvios de frequência e de variação de potência na linha de interligação, assegurará a restauração final dos valores destes componentes a zero. Isto é evidente a partir do fato de que a ação integral garante a redução do ECA a zero, conforme as equações (5.5) e (5.6).

$$ECA_1 = k_1 \Delta P_{TL12} + B_1 p\delta = 0$$

$$ECA_2 = k_2 \Delta P_{TL21} + B_2 p\delta = 0$$

Assim, para valores não nulos de  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $B_1$  e  $B_2$  as equações (5.5) e (5.6) conduzirão  $p\delta = 0$  e  $\Delta P_{TL12} = 0$ , independentemente dos valores destas constantes, conforme figuras comparativas 5.14, 5.15 e 5.16.

#### 5.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Atendendo um dos objetivos em adaptar as modificações da geração devido as variações de cargas em uma determinada área, adicionou-se ao sistema até então somente com regulador primário o “controle suplementar”.

A finalidade do controle suplementar no sistema é conduzir para zero o valor em regime permanente, caso ocorra variação de carga em uma dada área, de modo que somente a geração desta área seja afetada, fazendo com que não ocorra, portanto, variação no fluxo de potência nas linhas de interligação e, além disso, o controle suplementar deve ser capaz de restabelecer a frequência para seu valor de referência.

Confrontando os resultados obtidos através dos cálculos efetuados com as equações matemáticas para o controle primário e as figuras 5.6; 5.8; 5.11; 5.12; 5.14; 5.15; 5.16 que são resultados das simulações utilizando o programa *ScicosLab* onde são apresentados simultaneamente os controles Primário e Suplementar.

Assim, vê-se que o *software ScicosLab* atende totalmente a proposta de obter o resultado final descrito por  $\Delta P_{TL} = 0$  e  $p\delta = 0$ , em todas as combinações de Erro de Controle de Área, que contenham componentes de desvio de frequência e de variação da potência da linha de interligação, permitindo a restauração final dos valores destes componentes a zero.

Os resultados gráficos mostram a eficiência do programa *ScicosLab* nas simulações propostos.

A próxima etapa é utilizar o *software ScicosLab*, em sistemas elétricos de geração e controle com dados reais do Sistema Elétrico Brasileiro

## Capítulo VI

# ANÁLISE DO CONTROLE AUTOMÁTICO DE FREQUÊNCIA DE UM SISTEMA CONSTITUÍDO POR TRÊS ÁREAS INTERLIGADAS

### 6.1 INTRODUÇÃO

O objetivo deste capítulo é avaliar o potencial de utilização do programa livre *ScicosLab* para modelar e simular a Dinâmica e Controle da Geração de um Sistema Elétrico de Potência mais abrangente, constituído neste caso por três áreas distintas interligadas.

Inicialmente as três áreas estão isoladas e sem utilização de nenhum tipo de controle, em seguida é feita a interligação das três áreas sem considerar nenhuma regulação, posteriormente as três áreas são interligadas e submetidas ao controle primário de carga-frequência e finalmente, é realizada a última análise considerando o controle suplementar.

Os dados das três áreas individuais são extraídos do sistema elétrico brasileiro, porém o modelo das linhas de interligação não corresponde exatamente ao existente. Isto pode ser justificado porque o objetivo principal não é representar o sistema elétrico e sim validar os modelos matemáticos apresentados por meio de simulações com o *software* livre *ScicosLab*.

### 6.2 ÁREAS CONSIDERADAS PARA SIMULAÇÃO

As áreas consideradas são configurações do sistema elétrico do sudeste do Brasil.

Área 1 - Usina Termelétrica de Igarapé;

Área 2 - Usina Hidrelétrica de Nova Ponte;

Área 3 - Usina Hidrelétrica de Igarapava.

A figura 6.1 mostra o mapa real das três áreas consideradas, obtida e disponibilizada no site do ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico) [09], incluindo os bancos de dados técnicos que serão utilizados nas simulações, os quais estão mostrados a seguir:

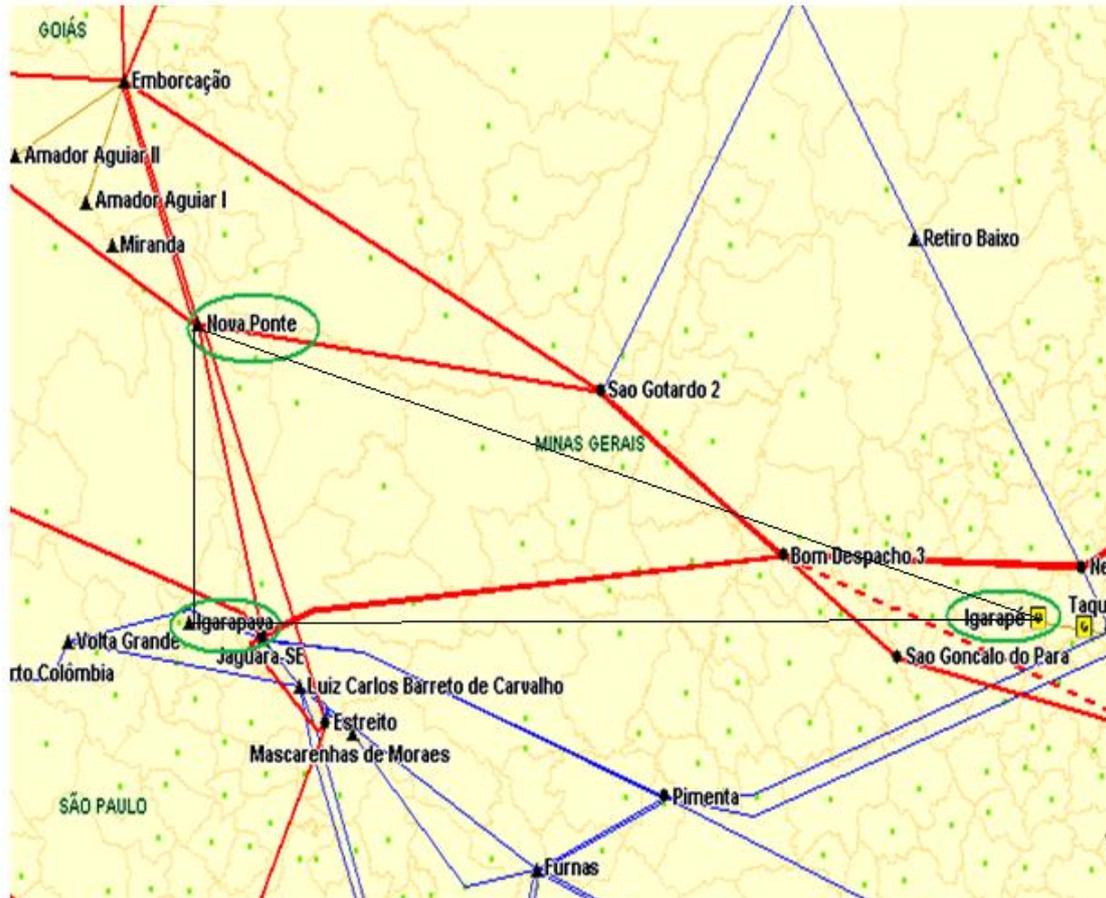


Figura 6.1 Três áreas interligadas consideradas nas simulações.

- Área 01: Usina Termelétrica de Igarapé  
Turbinas a vapor com reaquecimento  
Potência instalada: 131 MW  
Rotação: 3600 rpm
- Área 02: Usina Hidrelétrica de Nova Ponte  
Turbina hidráulicas  
Potência instalada: 510 MW ( 3 máquinas de 170 MW cada)  
Rotação: 166,3 rpm
- Área 03: Usina Hidrelétrica de Igarapava  
Turbinas hidráulicas  
Potência instalada: 210 MW (5 máquinas de 42 MW cada)  
Rotação: 112,5 rpm

Para completar a modelagem do sistema ainda são necessários alguns parâmetros, tais como, o coeficiente de modelagem da carga de cada área (D), coeficiente de potência sincronizante das três interligações (T) e a inércia efetiva de cada máquina ( $M = 2H$ ).

- Amortecimento da carga (D)

Em cada área de análise será considerado um amortecimento de 1 pu (significa que para cada 1% de variação da frequência a carga varia de 1%) na base de potência instalada de cada área. Para esta simulação será considerada uma potência base de 500MVA. Logo para cada área deve-se alterar o valor de D para a potência base considerada, ou seja:

$$\text{Área 01: } D_1 = 1 \frac{131}{500} = 0,262 \text{ p.u}$$

$$\text{Área 02: } D_2 = 1 \frac{510}{500} = 1,02 \text{ p.u}$$

$$\text{Área 03: } D_3 = 1 \frac{210}{500} = 0,42 \text{ p.u}$$

- Coeficiente de potência sincronizante (T)

Em cada linha de interligação, foi considerado o mesmo coeficiente de potência sincronizante, cujo valor é de 0,1 p.u, ou seja:

$$T_{12} = T_{23} = T_{31} = 0,1 \text{ p.u.}$$

- Inércia efetiva (M)

A constante de inércia (H) pode ser encontrada em função da velocidade de rotação e da potência das máquinas. Desta forma, de acordo com os parâmetros das máquinas, foram utilizados os seguintes valores para cada área.

$$\text{Área 01: } H_1 = 3 \rightarrow M_1 = 2 H_1 = 6 \text{ s}$$

$$\text{Área 02: } H_2 = 9 \rightarrow M_2 = 2 H_2 = 18 \text{ s}$$

$$\text{Área 03: } H_3 = 5 \rightarrow M_3 = 2 H_3 = 10 \text{ s}$$

## 6.3 CASOS DE SIMULAÇÃO

### 6.3.1 Caso 1: As Três Áreas Operando Isoladamente

Nesta primeira simulação tem-se por objetivo analisar a variação de frequência em razão das variações de carga em degrau, estando as três áreas operando isoladamente.

De acordo com a equação (4.12), o desvio de frequência em regime permanente com o regulador equivalente bloqueado em um sistema isolado, para cada área será de:

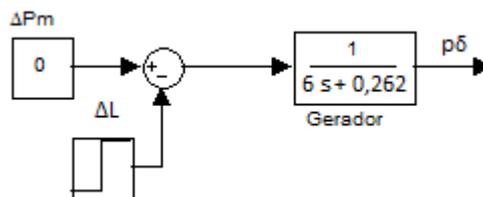
$$\text{Área 01} \quad \Rightarrow \quad p\delta_1 = \frac{-\Delta L_1}{D_1}$$

$$\text{Área 02} \quad \Rightarrow \quad p\delta_2 = \frac{-\Delta L_2}{D_2}$$

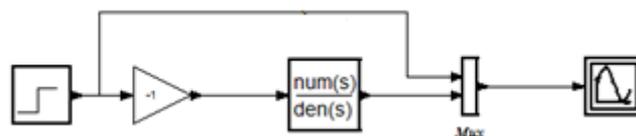
$$\text{Área 03} \quad \Rightarrow \quad p\delta_3 = \frac{-\Delta L_3}{D_3}$$

- Área 01

Valores a serem considerados, para esta simulação:  $M_1 = 6$  s;  $D_1 = 0,262$  p.u e  $\Delta L_1 = 0,10$  p.u, figura 6.2 que representa o diagrama de blocos para simulação da área 1, isoladamente, considerando como sendo a Usina Termelétrica de Igarapé:



(a) Diagrama de blocos convencional



(b) Diagrama de blocos na configuração *ScicosLab*

Figura 6.2 – Diagrama de blocos para simulação da área 1 isoladamente

$$p\delta_1 = \frac{-\Delta L_1}{D_1} = \frac{-0,10}{0,262} = -0,382 \text{ p.u} \quad (\text{redução da frequência})$$

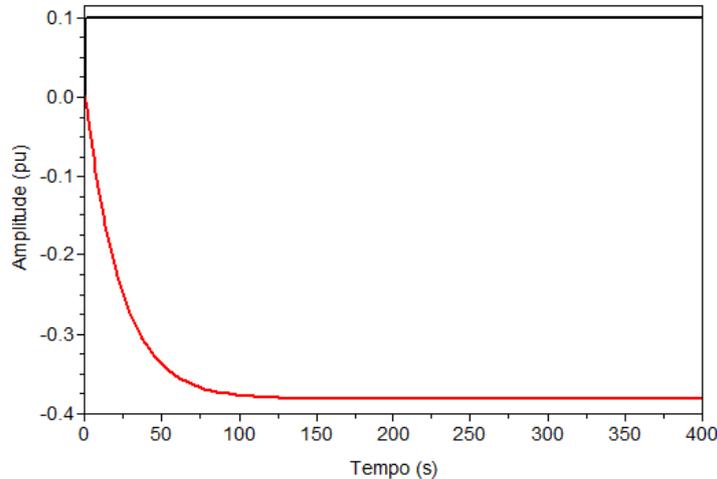
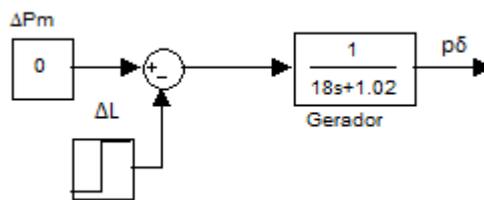


Figura 6.3 Variação da carga  $\Delta L_1$  (preto) e desvio da frequência  $p\delta_1$  (vermelho) de um sistema isolado

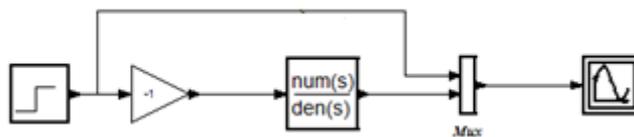
Verifica-se que o valor teórico coincide com o resultado da simulação, tanto na variação da carga  $\Delta L_1 = 0,10$  p.u, como no desvio da frequência que varia entre  $-0,375$  p.u e  $-0,4$  p.u.

- Área 02

Valores a serem considerados, para esta simulação:  $M_2 = 18$  s;  $D_2 = 1,02$  p.u e  $\Delta L_2 = 0,10$  p.u, figura 6.4, que representa o diagrama de blocos para simulação da área 2, isoladamente, considerando como sendo a Usina Hidrelétrica de Nova Ponte:



(a) Diagrama de blocos convencional



(b) Diagrama de blocos na configuração *ScicosLab*

Figura 6.4 – Diagrama de blocos para simulação da área 2 isoladamente

$$p\delta_2 = \frac{-\Delta L_2}{D_2} = \frac{-0,10}{1,02} = -0,098 \text{ p.u} \quad (\text{redução da frequência})$$

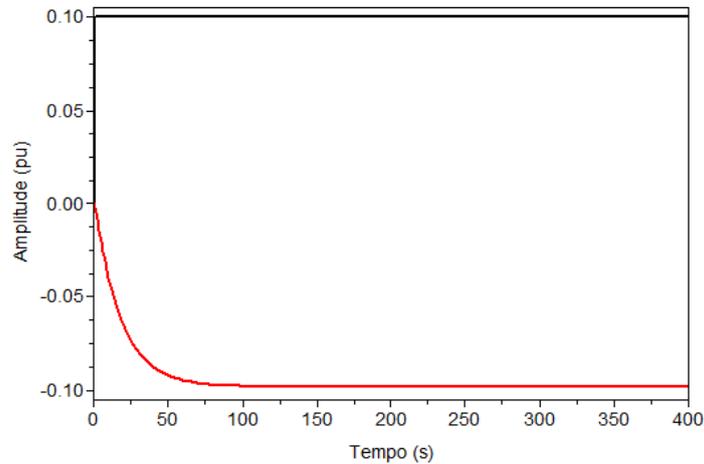
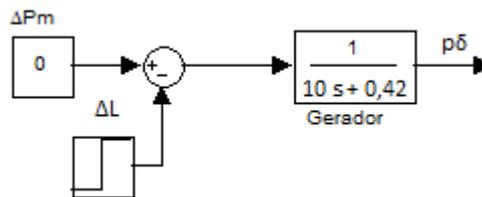


Figura 6.5 - Variação da carga  $\Delta L_2$  (preto) e variação da frequência  $p\delta_2$  (vermelho) de um sistema isolado.

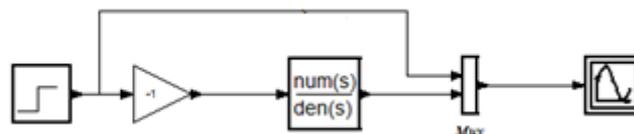
Verifica-se que o valor teórico coincide com o resultado da simulação, tanto na variação da carga  $\Delta L_2 = 0,10$  p.u, como no desvio da frequência que varia entre  $-0,0875$  p.u e  $-0,10$  p.u.

- Área 03

Valores a serem considerados, para esta simulação:  $M_3 = 10$  s;  $D_3 = 0,42$  p.u e  $\Delta L_3 = 0,10$  p.u, figura 6.6, que representa o diagrama de blocos para simulação da área 3, isoladamente, considerando como sendo Usina Hidrelétrica de Igarapava



(a) Diagrama de blocos convencional



(b) Diagrama de blocos na configuração *ScicosLab*

Figura 6.6 – Diagrama de blocos para simulação da área 3 isoladamente

$$p\delta_3 = \frac{-\Delta L_3}{D_3} = \frac{-0,1}{0,42} = -0,238 \text{ p.u} \quad (\text{redução da frequência})$$

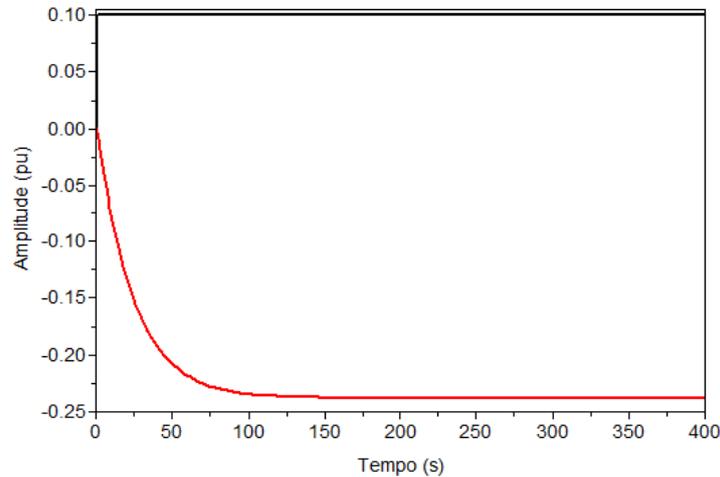


Figura 6.7 - Variação da carga  $\Delta L_3$  (preto) e variação da frequência  $p\delta_3$  (vermelho) de um sistema isolado

Verifica-se que o valor teórico coincide com o resultado da simulação, tanto na variação da carga  $\Delta L_3 = 0,10$  p.u, como no desvio da frequência que varia entre  $-0,225$  p.u e  $-0,25$  p.u.

As figuras 6.2, 6.4 e 6.6 mostram os diagramas de blocos de áreas com sistemas isolados, respectivamente às Usinas Termelétrica de Igarapé, Usina Hidrelétrica de Ponte Nova e Usina Hidrelétrica de Igarapava, sofrendo uma variação de carga. As figuras 6.3, 6.5 e 6.7, mostram os resultados da simulação, utilizando o programa *ScicosLab*.

Comparando os resultados obtidos graficamente pelas simulações em regime permanente com os resultados teóricos, conclui-se que neste primeiro caso o *software ScicosLab* está operando de forma eficiente, isto é tem os mesmos resultados.

### 6.3.2 Caso 2: As Três Áreas Interligadas

Para obter o diagrama de blocos equivalente procede-se analogamente ao que foi feito para duas áreas interligadas, considerando corretamente os fluxos de potência existentes. Para o caso de alteração no valor da carga ( $\Delta L_1$ ,  $\Delta L_2$  ou  $\Delta L_3$ ), e considerando que  $\Delta P_{m1} = \Delta P_{m2} = \Delta P_{m3} = 0$  (visto que não estão sendo considerados os elementos de fornecimento de potência mecânica), em regime permanente pode-se dizer:

$$p\delta_1 = p\delta_2 = p\delta_3 = p\delta \quad (6.1)$$

$$-\Delta P_{TL12} + \Delta P_{TL31} - \Delta L_1 = p\delta D_1 \quad (6.2)$$

$$\Delta P_{TL12} - \Delta P_{TL23} - \Delta L_2 = p\delta D_2 \quad (6.3)$$

$$\Delta P_{TL23} - \Delta P_{TL31} - \Delta L_3 = p\delta D_3 \quad (6.4)$$

Somando as equações (6.2), (6.3) e (6.4), determina-se a equação (6.5):

$$p\delta = \frac{-\Delta L_1 - \Delta L_2 - \Delta L_3}{D_1 + D_2 + D_3} \quad (6.5)$$

Para encontrar as expressões de  $\Delta P_{TL12}$ ,  $\Delta P_{TL23}$  e  $\Delta P_{TL31}$  deve-se considerar que:

$$\Delta P_{TL12} + \Delta P_{TL23} + \Delta P_{TL31} = 0 \quad (6.6)$$

A figura 6.8 ilustra o diagrama de blocos para as três áreas interligadas sem atuação de nenhum tipo de controle.

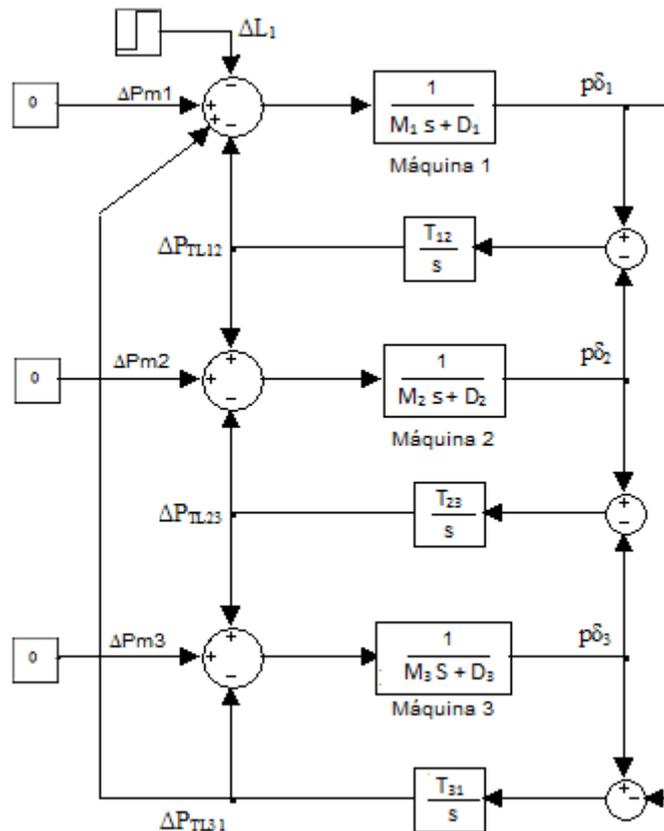


Figura 6.8 - Diagrama de blocos para três áreas interligadas sem atuação de nenhum tipo de controle

A equação (6.6) é válida, uma vez que o sistema está conectado em anel. Desta forma substituindo a equação (6.5) nas equações (6.2), (6.3) e (6.4), e resolvendo o sistema de equação formado, obtêm-se as seguintes expressões para as variações nos fluxos de potência das linhas de interligação:

$$\Delta P_{TL12} = \frac{1}{3} \left[ \frac{-\Delta L_1(2D_2 + D_3) + \Delta L_2(2D_1 + D_3) + \Delta L_3(D_1 - D_2)}{D_1 + D_2 + D_3} \right] \quad (6.7)$$

$$\Delta P_{TL23} = \frac{1}{3} \left[ \frac{\Delta L_1(D_2 - D_3) - \Delta L_2(2D_3 + D_1) + \Delta L_3(2D_2 + D_1)}{D_1 + D_2 + D_3} \right] \quad (6.8)$$

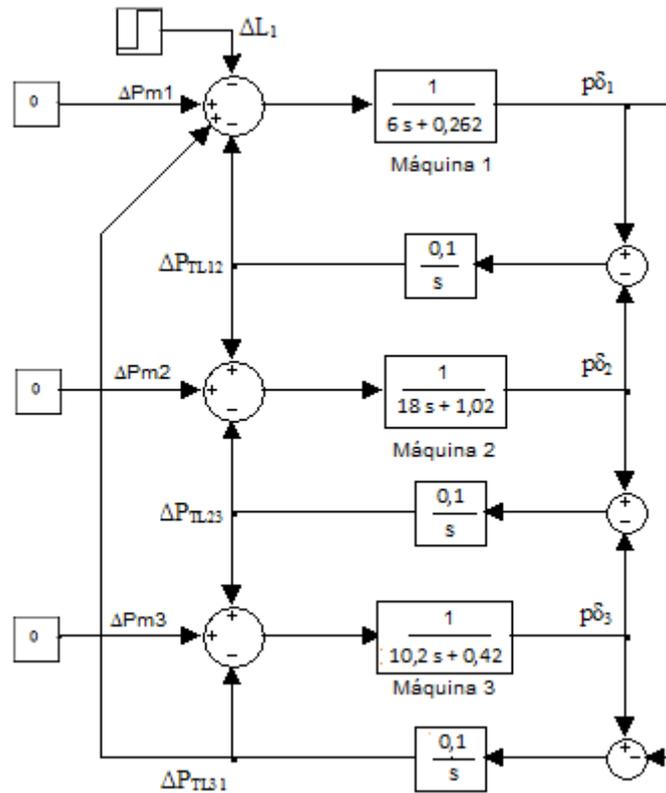
$$\Delta P_{TL31} = \frac{1}{3} \left[ \frac{\Delta L_1(2D_3 + D_2) + \Delta L_2(D_3 - D_1) - \Delta L_3(2D_1 + D_2)}{D_1 + D_2 + D_3} \right] \quad (6.9)$$

Neste momento o interesse é verificar o resultado da simulação na variação de frequência em razão da variação de carga em degrau, apenas na área 1, com os valores da Tabela II.

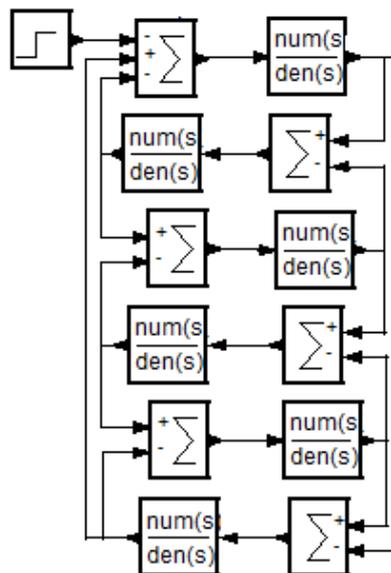
Tabela II – Dados utilizados com acréscimo de carga somente na área 1 – Usina Termelétrica de Igarapé

Variação de Carga (p.u)	$\Delta L_1 = 0,05$	$\Delta L_2 = 0,00$	$\Delta L_3 = 0,00$
Amortecimento da carga (p.u)	$D_1 = 0,262$	$D_2 = 1,02$	$D_3 = 0,42$
Coeficiente de Potência sincronizante (p.u)	$T_{12} = 0,1$	$T_{23} = 0,1$	$T_{31} = 0,1$
Constante de inércia (s)	$M_1 = 6$	$M_2 = 18$	$M_3 = 10$

A figura 6.9 mostra o esquema de simulação com as três áreas interligadas, sem regulador, utilizando a Tabela II para a simulação sendo (a) o diagrama de blocos convencional e (b) o diagrama de blocos na configuração do *ScicosLab*.



a – Diagrama de blocos convencional



b – Diagrama de blocos na configuração do ScicosLab

Figura 6.9 – Diagrama de blocos para simulação com as três áreas interligadas, sem regulador.

Para ilustrar, as figuras 6.10, 6.11, 6.12 representam a resposta da frequência em cada área e a figura 6.13, para efeito de comparação, inclui as respostas das frequências das três áreas no mesmo gráfico.

Substituindo os valores da Tabela II na equação (6.5), temos:

$$p\delta = p\delta_1 = p\delta_2 = p\delta_3 = \frac{-0,05}{0,262 + 1,02 + 0,4} = -0,0297 \text{ p.u.}$$

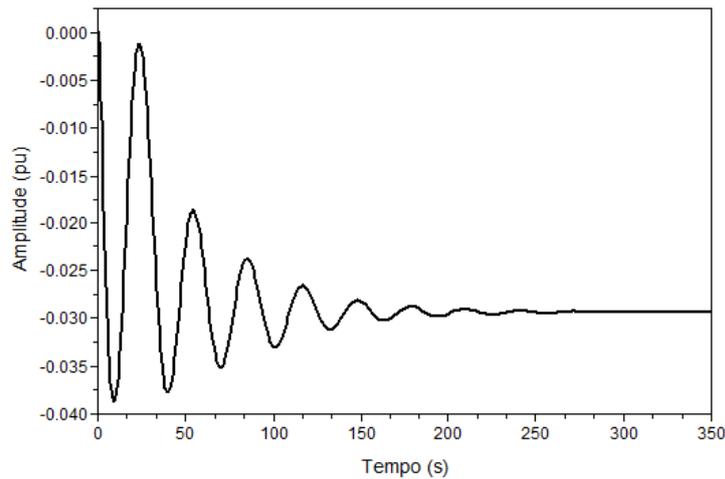


Figura 6.10 – Variação da frequência  $p\delta_1$

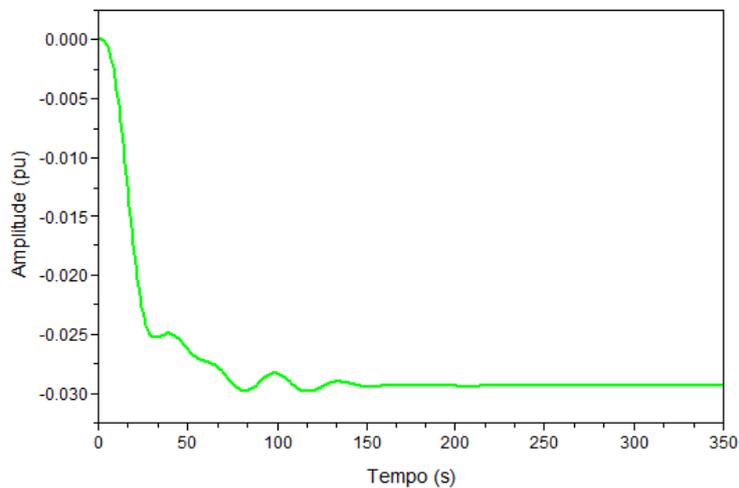


Figura 6.11 – Variação da frequência  $p\delta_2$

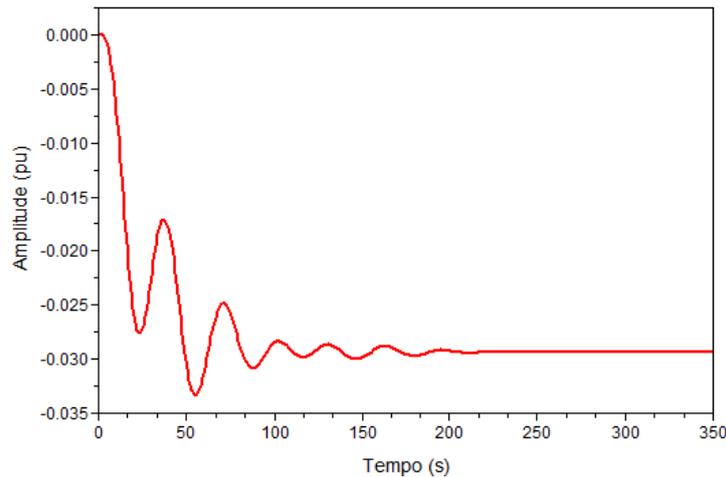


Figura 6.12 – Variação da frequência  $p\delta_3$

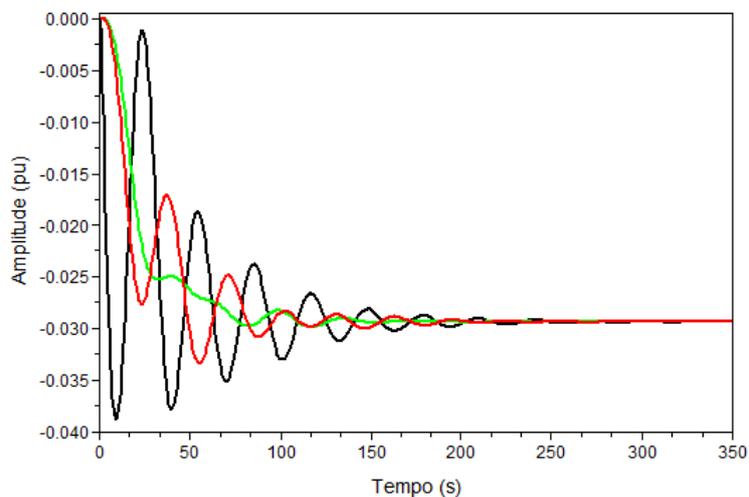


Figura 6.13 – Variação da frequência  $p\delta_1$  (preto),  $p\delta_2$  (verde) e  $p\delta_3$  (vermelho)

Pode observar que as figuras 6.10, 6.11 e 6.12 possuem em comum os resultados dos desvios de frequência em regime permanente variando entre  $-0,0275$  p.u e  $-0,030$  p.u e a figura 6.13 confirma esta variação e que em regime transitório percebe a ação efetiva do amortecimento de carga. Novamente o *ScicosLab* mostrou eficiência ao comparar o resultado da simulação com o resultado teórico.

Além dos desvios de frequências, surgem também a variação na potência da linha de interligação da área 1 com a área 2 -  $\Delta P_{TL12}$ , devido a variação de carga na área 1, como mostrado na figura 6.14 a qual foi obtida através da equação (6.7):

Substituindo os valores da Tabela II na equação (6.7), temos:

$$\Delta P_{TL12} = \frac{1}{3} \left[ \frac{-0,05(2 \times 1,02 + 0,42)}{0,262 + 1,02 + 0,42} \right] = -0,0241 \text{ p.u}$$

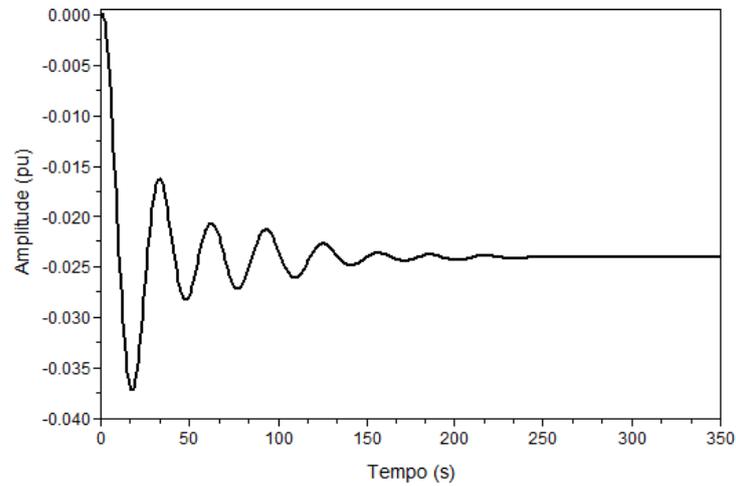


Figura 6.14 – Variação da Potência de Interligação  $\Delta P_{TL12}$

O valor gráfico da variação da potência na linha de interligação da área 1 com a área 2 encontra-se entre  $-0,0225 \text{ p.u}$  e  $-0,025 \text{ p.u}$  em regime permanente.

A variação na potência da linha de interligação entre a área 2 e a área 3 -  $\Delta P_{TL23}$ , devido a carga na área 1 é mostrado na figuras 6.15.

Substituindo os valores da Tabela II na equação (6.8), temos:

$$\Delta P_{TL23} = \frac{1}{3} \left[ \frac{0,05(1,02 - 0,42)}{0,262 + 1,02 + 0,42} \right] = +0,00587 \text{ p.u}$$

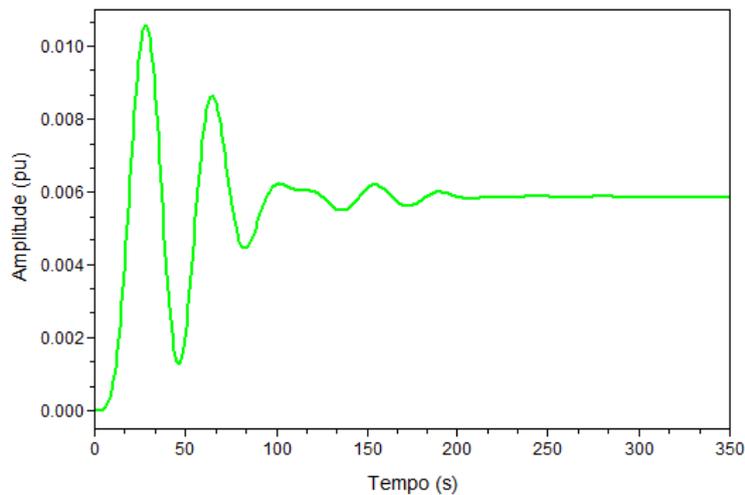


Figura 6.15 – Variação da Potência de Interligação  $\Delta P_{TL23}$

O valor gráfico da variação da potência na linha de interligação da área 2 com a área 3 encontra-se entre + 0,00525 p.u e + 0,006 p.u em regime permanente.

A variação na potência da linha de interligação entre a área 3 e a área 1 -  $\Delta P_{TL31}$ , devido a carga apenas na área 1 é mostrado nas figuras 6.16.

Substituindo os valores da Tabela II na equação (6.9), temos:

$$\Delta P_{TL31} = \frac{1}{3} \left[ \frac{0,05(2 \times 0,42 + 1,02)}{0,262 + 1,02 + 0,42} \right] = + 0,0182 \text{ p.u}$$

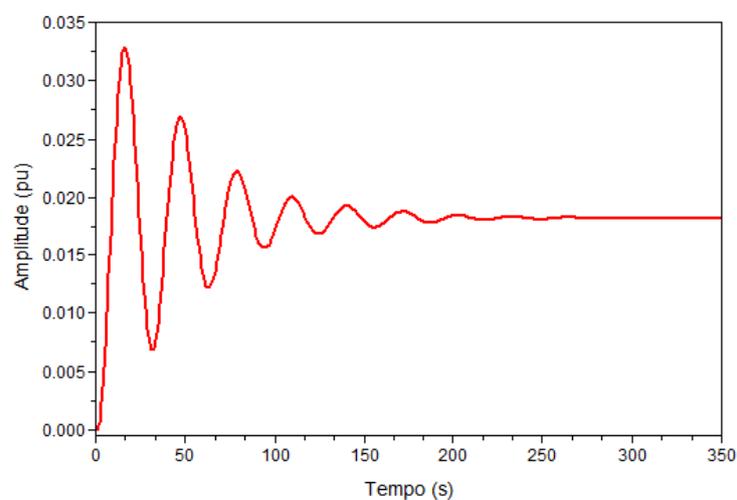


Figura 6.16 – Variação da Potência de Interligação  $\Delta P_{TL31}$

O valor gráfico da variação da potência na linha de interligação da área 3 com a área 1 encontra-se entre + 0,0175 p.u e + 0,020 p.u em regime permanente.

A figura 6.17, mostra simultaneamente a variação de potência nas linhas de interligação entre as áreas.

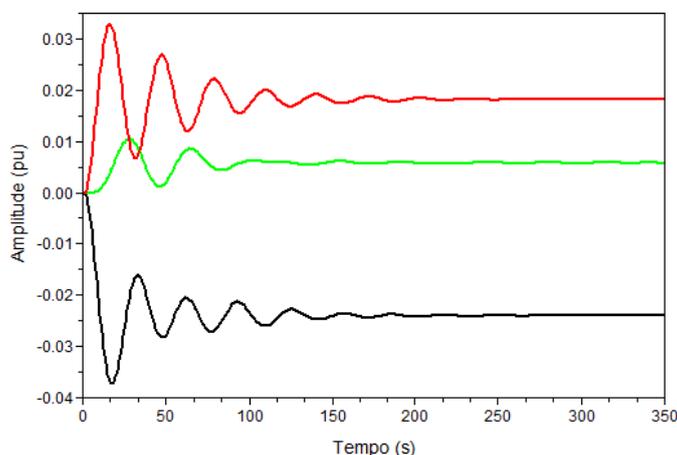


Figura 6.17 – Variação da Potência de Interligação entre Áreas  $\Delta P_{TL12}$  (preto),  $\Delta P_{TL23}$  (verde) e  $\Delta P_{TL31}$  (vermelho)

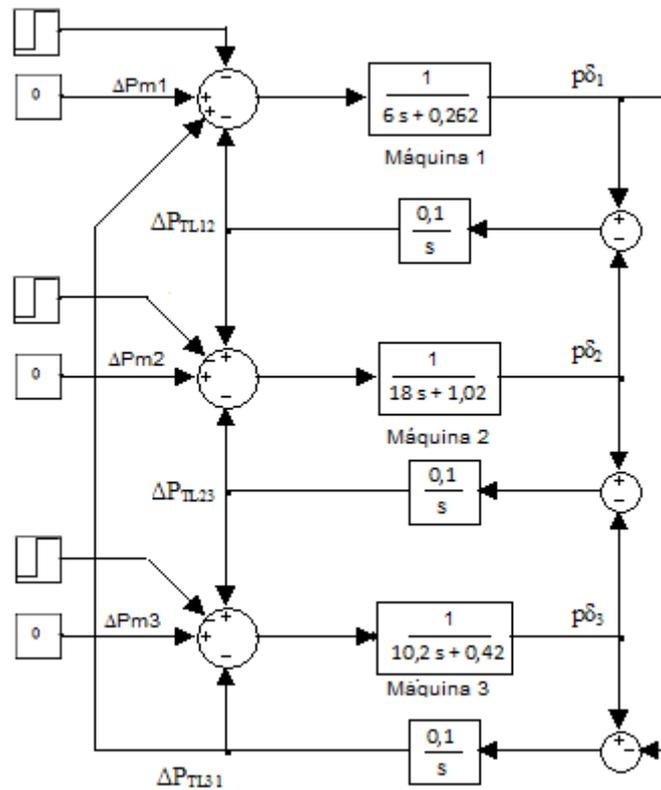
Confirma-se que a variação da potência nas linhas de interligação obtida pela simulação figura 6.17,  $\Delta P_{TL12}$  (preto),  $\Delta P_{TL23}$  (verde) e  $\Delta P_{TL31}$  (vermelho) são semelhantes aos valores calculados, isto é,  $\Delta P_{TL12} = -0,0241$ p.u,  $\Delta P_{TL23} = +0,00587$ p.u e  $\Delta P_{TL31} = +0,0182$ p.u, confirmando a eficiência do *ScicosLab*.

Novamente o interesse é verificar o resultado da simulação no desvio de frequência em razão da variação de carga em degrau, nas 3 áreas, com os valores da Tabela III e estando as três áreas conectadas, mas sem ação de nenhum tipo de regulador

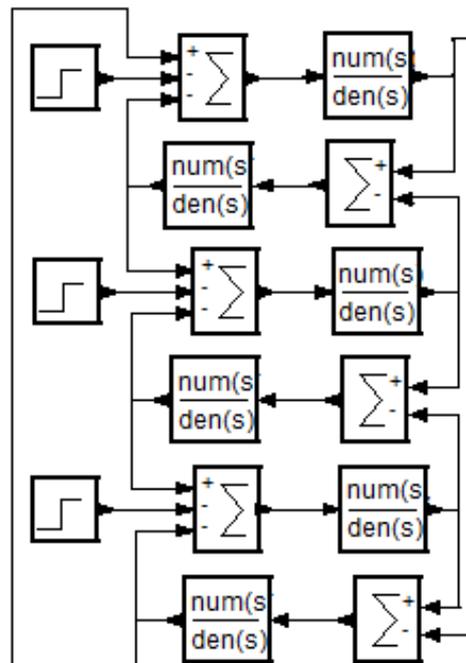
Tabela III – Dados utilizados para operação isolada (500MVA base) com variação de carga nas três áreas

Variação de Carga na área (p.u)	$\Delta L_1 = -0,05$	$\Delta L_2 = +0,2$	$\Delta L_3 = -0,1$
Amortecimento da carga (p.u)	$D_1 = 0,262$	$D_2 = 1,02$	$D_3 = 0,42$
Coefficiente de Potência sincronizante (p.u)	$T_{12} = 0,1$	$T_{23} = 0,1$	$T_{31} = 0,1$
Constante de inércia (s)	$M_1 = 6$	$M_2 = 18$	$M_3 = 10$

As três áreas interligadas, com variação de carga em degrau, conforme Tabela III.



a – Diagrama de blocos convencional



b – Diagrama de blocos do ScicosLab

Figura 6.18 - Diagrama de blocos para simulação com as três áreas interligadas, sem regulação

A proposta deste item é observar a atuação da carga em cada área conforme os dados da Tabela III, obtendo os resultados com a simulação do *software ScicosLab*, para os desvios de frequências e variação da potência na linha de interligação das áreas, conforme a figura 6.18.

A figura 6.19 apresenta as variações de carga nas três.

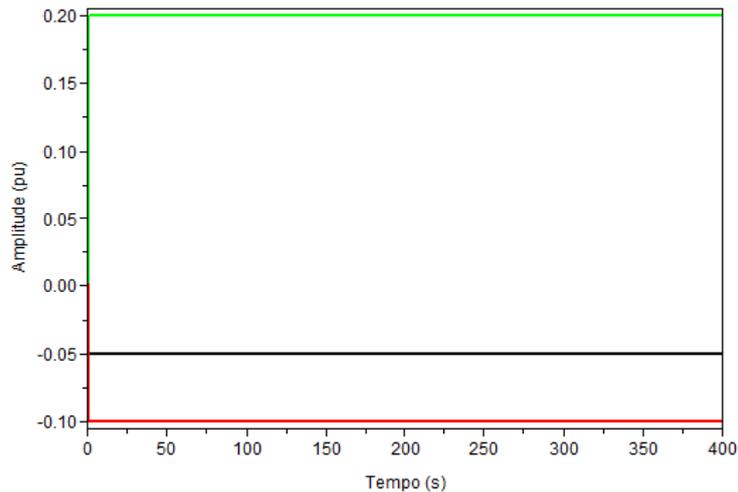


Figura 6.19 – Variação da carga  $\Delta L_1$  (preto),  $\Delta L_2$  (verde) e  $\Delta L_3$  (vermelho)

O desvio de frequência em regime permanente para as três áreas interligadas sem a presença de nenhum tipo de regulador, de acordo com a equação (6.5) e os valores da Tabela III é:

$$p\delta = p\delta_1 = p\delta_2 = p\delta_3 = \frac{+0,05 - 0,2 + 0,1}{1,02 + 0,262 + 0,42} = -0,0294 \text{ p.u}$$

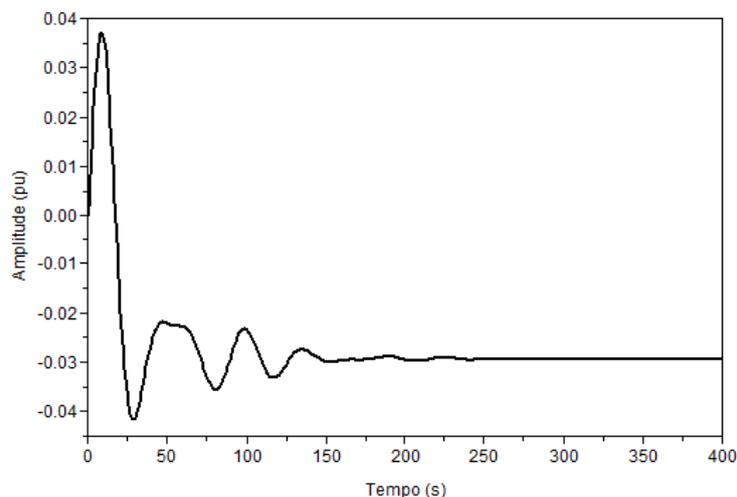


Figura 6.20 – Desvio de frequência da área 1 -  $p\delta_1$ (preto).

A figura 6.20 indica a resposta da frequência para a área 1 e constata-se que este valor está entre  $-0,025$  p.u e  $-0,30$  p.u e o valor calculado  $-0,0294$  p.u em regime permanente.

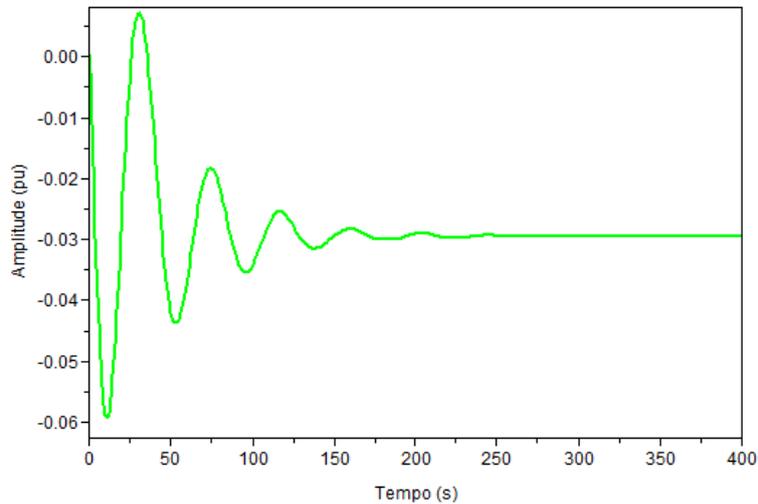


Figura 6.21 – Desvio de frequência da área 2 -  $p\delta_2$ (verde)

A figura 6.21 indica a resposta da frequência para a área 2 e constata-se que este valor está entre  $-0,025$  p.u e  $-0,30$  p.u e o valor calculado  $-0,0294$  p.u em regime permanente.

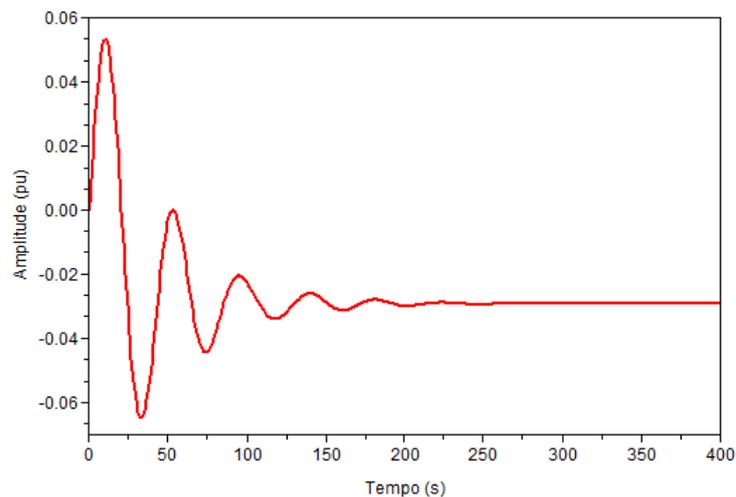


Figura 6.22 – Variação da frequência  $p\delta_3$ (vermelho)

A figura 6.22 indica a resposta da frequência para a área 3 e constata-se que este valor está entre  $-0,025$  p.u e  $-0,30$  p.u e o valor calculado  $-0,0294$  p.u em regime permanente.

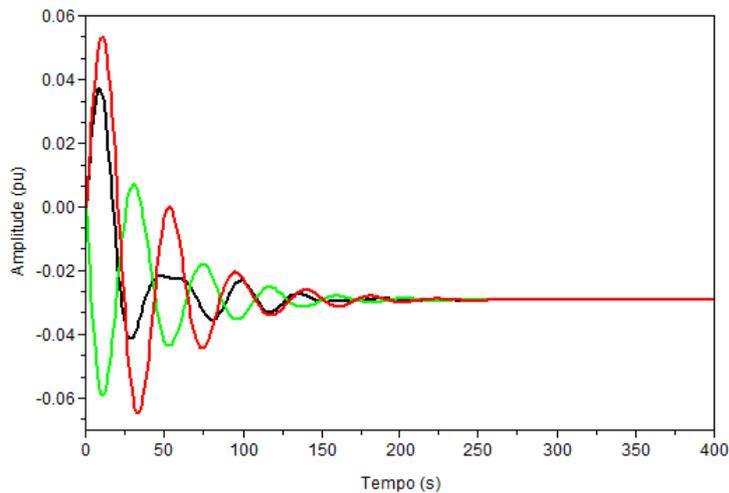


Figura 6.23 – Variação da frequência  $p\delta_1$ (preto),  $p\delta_2$ (verde) e  $p\delta_3$ (vermelho)

A figura 6.23 incorpora as respostas das frequências das três áreas no mesmo gráfico, onde podemos constatar que o valor gráfico na região da estabilidade está entre  $-0,0275$  p.u e  $-0,0325$  p.u.

Analisa-se agora a variação da potência na linha de interligação entre a área 1 e a área 2,  $\Delta P_{TL12}$ , cuja equação que representa esta variação é a (6.7).

Substituindo os valores da Tabela III, temos:

$$\Delta P_{TL12} = \frac{1}{3} \left[ \frac{+0,05(2 \times 1,02 + 0,42) + 0,2(2 \times 0,262 + 0,42) - 0,1(0,262 - 1,02)}{1,02 + 0,262 + 0,42} \right]$$

$$\Delta P_{TL12} = 0,0759 \text{ p. u}$$

Simulando através do *ScicosLab* o diagrama de blocos 6.18, obtém-se a figura 6.24, que representa o  $\Delta P_{TL12}$ :

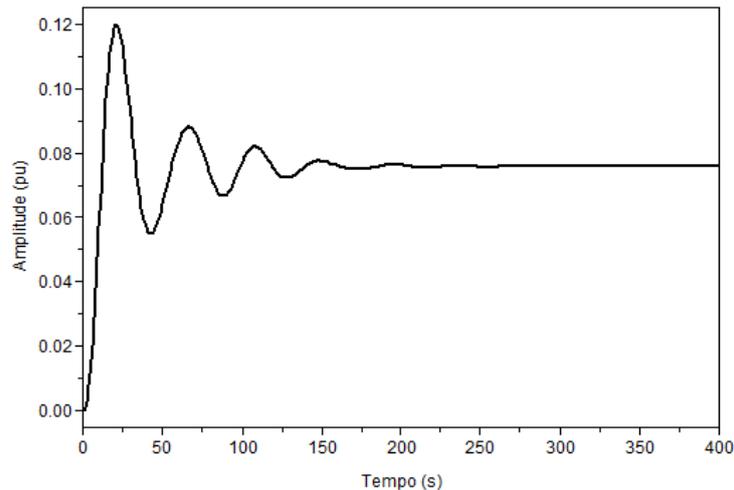


Figura 6.24 – Variação da Potência de Interligação  $\Delta P_{TL12}$

Observa-se que o resultado gráfico está entre + 0,07 p.u e + 0,08 p.u. e o valor teórico é de + 0,0759 p.u, comprovando a eficiência do *ScicosLab*.

Próxima etapa, analisa-se a variação da potência na linha de interligação entre a área 2 e a área 3,  $\Delta P_{TL23}$ , cuja equação que representa esta variação é a (6.8).

Substituindo os valores Tabela III, temos:

$$\Delta P_{TL23} = \frac{1}{3} \left[ \frac{-0,05(1,02 - 0,42) - 0,2(2 \times 0,42 + 0,262) - 0,1(2 \times 1,02 + 0,262)}{1,02 + 0,262 + 0,42} \right]$$

$$\Delta P_{TL23} = -0,0941 \text{ p.u}$$

Simulando através do *ScicosLab* o diagrama de blocos 6.18, obtém-se a figura 6.25, que representa o  $\Delta P_{TL23}$ :

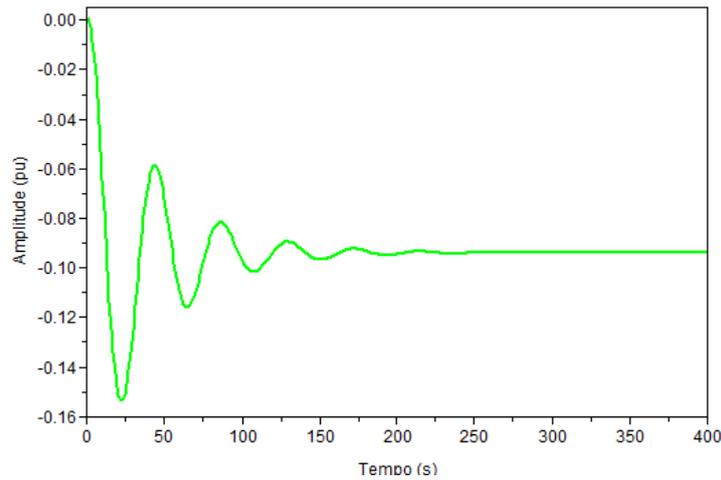


Figura 6.25 – Variação da Potência de Interligação  $\Delta P_{TL23}$

Observa-se que o resultado gráfico está entre  $-0,09$  p.u e  $-0,10$  p.u e o valor teórico é de  $-0,0941$  p.u comprovando a eficiência do *ScicosLab*.

Finalmente analisa-se a variação da potência na linha de interligação entre a área 3 e a área 1,  $\Delta P_{TL31}$ , cuja equação que representa esta variação é a (6.9).

Substituindo os da Tabela III, temos:

$$\Delta P_{TL31} = \frac{1}{3} \left[ \frac{-0,05(2 \times 0,42 + 1,02) + 0,2(0,42 - 0,262) + 0,1(2 \times 0,262 + 1,02)}{1,02 + 0,262 + 0,42} \right]$$

$$\Delta P_{TL31} = 0,0182 \text{ p.u}$$

Simulando através do *ScicosLab* o diagrama de blocos 6.18, obtém-se a figura 6.26, que representa o  $\Delta P_{TL31}$ :

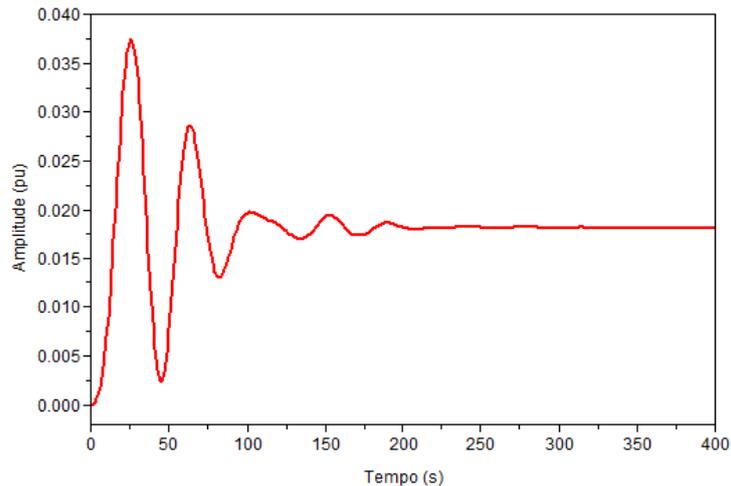


Figura 6.26 – Variação da Potência de Interligação  $\Delta P_{TL31}$

Observa-se que o resultado gráfico está entre + 0,0175 p.u e + 0,020 p.u e o valor teórico é de + 0, 0182 p.u comprovando a eficiência do *ScicosLab*.

A figura 6.27 representa o resultado da variação da potência entre as linhas de interligação.

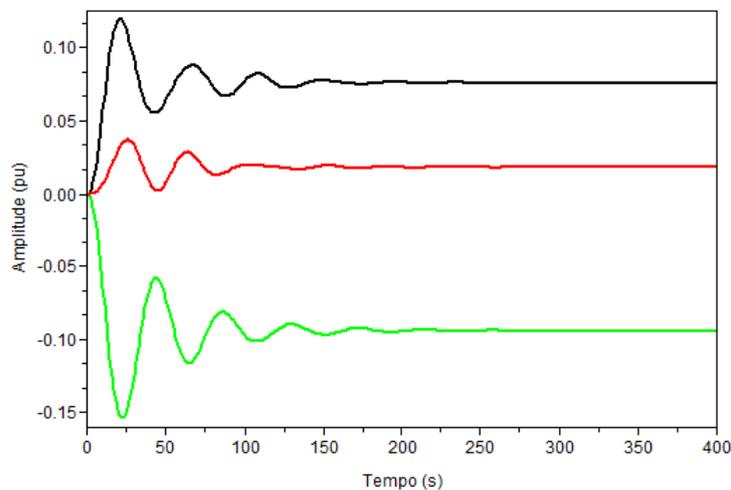


Figura 6.27 – Variação da Potência de Interligação entre Áreas  $\Delta P_{TL12}$  (preto),  $\Delta P_{TL23}$  (verde) e  $\Delta P_{TL31}$  (vermelho)

Comparando os resultados obtidos com os valores calculados, verifica que o sistema simulado comporta de acordo com esperado ou seja os valores teóricos (calculados) são semelhantes aos obtidos pela simulação com o *Software ScicosLab*.

### 6.3.3 Caso 3: As Três Áreas Interligadas sob ação do Controle Primário

A figura 6.28 mostra a forma teórica do esquema de simulação com as três áreas interligadas, com controle primário de carga-frequência e variação de carga nas três áreas, o que possibilita o equacionamento do desvio de frequência, variação da potência nas linhas de interligações das áreas e a variação da potência de geração.

O diagrama denominado como convencional é a que apresenta a forma de equacionamento do gerador, da turbina e do regulador, pois esta formatação não é apresentado no diagrama de blocos na configuração *ScicosLab*.

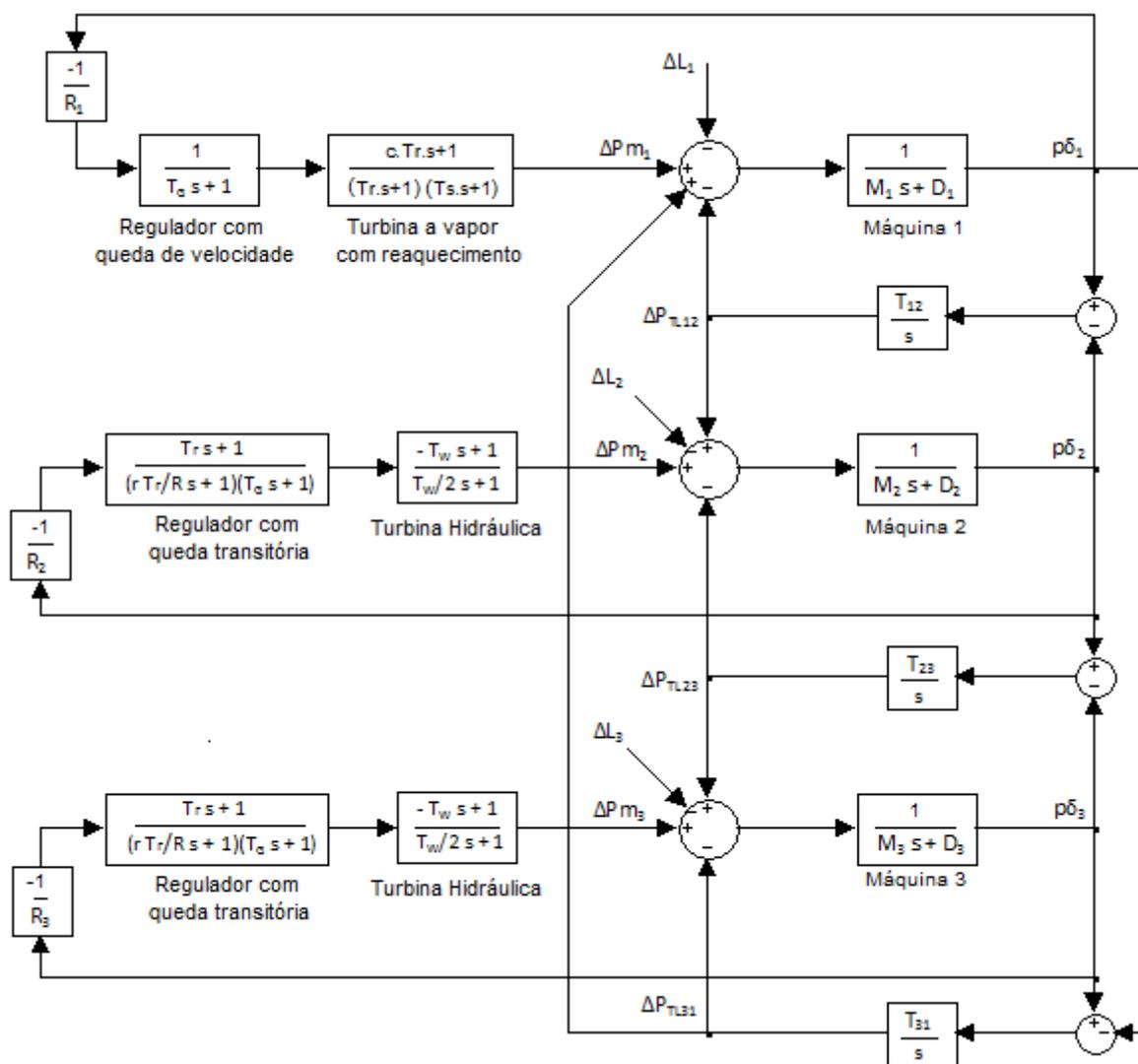


Figura 6.28 – Diagrama de blocos para simulação com três áreas interligadas sob a ação do controle primário, com a variação da carga nas três áreas.

Dependendo da intensidade da variação da carga, o sistema pode operar com variações inaceitáveis, desta forma torna-se necessário a inserção de reguladores de velocidade.

Para o caso de alteração no valor da carga ( $\Delta L_1$ ,  $\Delta L_2$  e  $\Delta L_3$ ) em regime permanente, atuando nas três áreas, a figura 6.28, permite escrever:

$$\Delta P_{m1} - \Delta P_{TL12} + \Delta P_{TL31} - \Delta L_1 = p\delta D_1 \quad (6.10)$$

$$\Delta P_{m2} + \Delta P_{TL12} - \Delta P_{TL23} - \Delta L_2 = p\delta D_2 \quad (6.11)$$

$$\Delta P_{m3} + \Delta P_{TL23} - \Delta P_{TL31} - \Delta L_3 = p\delta D_3 \quad (6.12)$$

$$\Delta P_{m1} = \frac{-p\delta_1}{R_1} = \frac{-p\delta}{R_1} \quad (6.13)$$

$$\Delta P_{m2} = \frac{-p\delta_2}{R_2} = \frac{-p\delta}{R_2} \quad (6.14)$$

$$\Delta P_{m3} = \frac{-p\delta_3}{R_3} = \frac{-p\delta}{R_3} \quad (6.15)$$

Substituindo as equações (6.13), (6.14) e (6.15) nas equações (6.10), (6.11) e (6.12), respectivamente, obtém-se as equações (6.16), (6.17) e (6.18):

$$\frac{-p\delta}{R_1} - \Delta P_{TL12} + \Delta P_{TL31} - \Delta L_1 = p\delta D_1 \quad (6.16)$$

$$\frac{-p\delta}{R_2} + \Delta P_{TL12} - \Delta P_{TL23} - \Delta L_2 = p\delta D_2 \quad (6.17)$$

$$\frac{-p\delta}{R_3} + \Delta P_{TL23} - \Delta P_{TL31} - \Delta L_3 = p\delta D_3 \quad (6.18)$$

Somando as equações (6.16), (6.17) e (6.18), encontra-se a equação (6.19):

$$p\delta = \frac{-\Delta L_1 - \Delta L_2 - \Delta L_3}{\left(\frac{1}{R_1} + D_1\right) + \left(\frac{1}{R_2} + D_2\right) + \left(\frac{1}{R_3} + D_3\right)} \quad (6.19)$$

Para encontrar as expressões de  $\Delta P_{TL12}$ ,  $\Delta P_{TL23}$  e  $\Delta P_{TL31}$  deve-se considerar, pelo fato do sistema estar conectado em anel, que:

$$\Delta P_{TL12} + \Delta P_{TL23} + \Delta P_{TL31} = 0 \quad (6.20)$$

Desta forma, substituindo (6.19) nas equações (6.16), (6.17) e (6.18) e resolvendo o sistema formado, obtém as seguintes expressões para variações dos fluxos de potência nas linhas de interligações, (6.21); (6.22); (6.23).

$$\Delta P_{TL12} = \frac{1}{3} \left( \frac{-\Delta L_1 \left[ 2 \left( \frac{1}{R_2} + D_2 \right) + \left( \frac{1}{R_3} + D_3 \right) \right] + \Delta L_2 \left[ 2 \left( \frac{1}{R_1} + D_1 \right) + \left( \frac{1}{R_3} + D_3 \right) \right] + \Delta L_3 \left[ \left( \frac{1}{R_1} + D_1 \right) - \left( \frac{1}{R_2} + D_2 \right) \right]}{\left( \frac{1}{R_1} + D_1 \right) + \left( \frac{1}{R_2} + D_2 \right) + \left( \frac{1}{R_3} + D_3 \right)} \right) \quad (6.21)$$

$$\Delta P_{TL23} = \frac{1}{3} \left( \frac{\Delta L_1 \left[ \left( \frac{1}{R_2} + D_2 \right) - \left( \frac{1}{R_3} + D_3 \right) \right] - \Delta L_2 \left[ 2 \left( \frac{1}{R_3} + D_3 \right) + \left( \frac{1}{R_1} + D_1 \right) \right] + \Delta L_3 \left[ 2 \left( \frac{1}{R_2} + D_2 \right) + \left( \frac{1}{R_1} + D_1 \right) \right]}{\left( \frac{1}{R_1} + D_1 \right) + \left( \frac{1}{R_2} + D_2 \right) + \left( \frac{1}{R_3} + D_3 \right)} \right) \quad (6.22)$$

$$\Delta P_{TL31} = \frac{1}{3} \left( \frac{\Delta L_1 \left[ 2 \left( \frac{1}{R_3} + D_3 \right) + \left( \frac{1}{R_2} + D_2 \right) \right] + \Delta L_2 \left[ \left( \frac{1}{R_3} + D_3 \right) - \left( \frac{1}{R_1} + D_1 \right) \right] - \Delta L_3 \left[ 2 \left( \frac{1}{R_1} + D_1 \right) + \left( \frac{1}{R_2} + D_2 \right) \right]}{\left( \frac{1}{R_1} + D_1 \right) + \left( \frac{1}{R_2} + D_2 \right) + \left( \frac{1}{R_3} + D_3 \right)} \right) \quad (6.23)$$

Logo, de acordo com as equações (6.19), (6.21), (6.22) e (6.23), encontra-se os valores em regime permanente do desvio da frequência e das potências nas linhas de interligação, quando de uma variação das cargas.

Além disso, é possível calcular a variação da potência gerada em cada área, sabendo-se que, em regime permanente, para cada gerador, a variação de sua potência mecânica é igual à variação de sua potência elétrica gerada.

Assim, as equações (6.24), (6.25) e (6.26), podem ser escritas da seguinte forma:

$$\Delta P_{G1} = \Delta P_{m1} = \frac{-p\delta}{R_1} \quad (6.24)$$

$$\Delta P_{G2} = \Delta P_{m2} = \frac{-p\delta}{R_2} \quad (6.25)$$

$$\Delta P_{G3} = \Delta P_{m3} = \frac{-p\delta}{R_3} \quad (6.26)$$

assim, substituindo a equação (6.19) nas equações (6.24), (6.25) e (6.26) obtém-se as equações (6.27), (6.28) e (6.29) respectivamente:

$$\Delta P_{G1} = \frac{\Delta L_1 + \Delta L_2 + \Delta L_3}{R_1 \left[ \left( \frac{1}{R_1} + D_1 \right) + \left( \frac{1}{R_2} + D_2 \right) + \left( \frac{1}{R_3} + D_3 \right) \right]} \quad (6.27)$$

$$\Delta P_{G2} = \frac{\Delta L_1 + \Delta L_2 + \Delta L_3}{R_2 \left[ \left( \frac{1}{R_1} + D_1 \right) + \left( \frac{1}{R_2} + D_2 \right) + \left( \frac{1}{R_3} + D_3 \right) \right]} \quad (6.28)$$

$$\Delta P_{G3} = \frac{\Delta L_1 + \Delta L_2 + \Delta L_3}{R_3 \left[ \left( \frac{1}{R_1} + D_1 \right) + \left( \frac{1}{R_2} + D_2 \right) + \left( \frac{1}{R_3} + D_3 \right) \right]} \quad (6.29)$$

As equações (6.27), (6.28) e (6.29) mostram que quando a potência da carga é alterada, ocorre variação de geração em todas as áreas, e essas variações dependem do estatismo do regulador de cada área (R), amortecimento das cargas (D) e, é claro, das variações de carga. Isto corresponde a dizer que se houver variação de carga somente em uma das áreas interligadas, ocorrerá variação da potência gerada em todas as áreas e não somente na área na qual houve a variação da carga. Além disso, devido ao fato de haver uma pequena variação na frequência do sistema, a soma da alteração da potência gerada nas três áreas é ligeiramente diferente da soma da variação das potências das cargas.

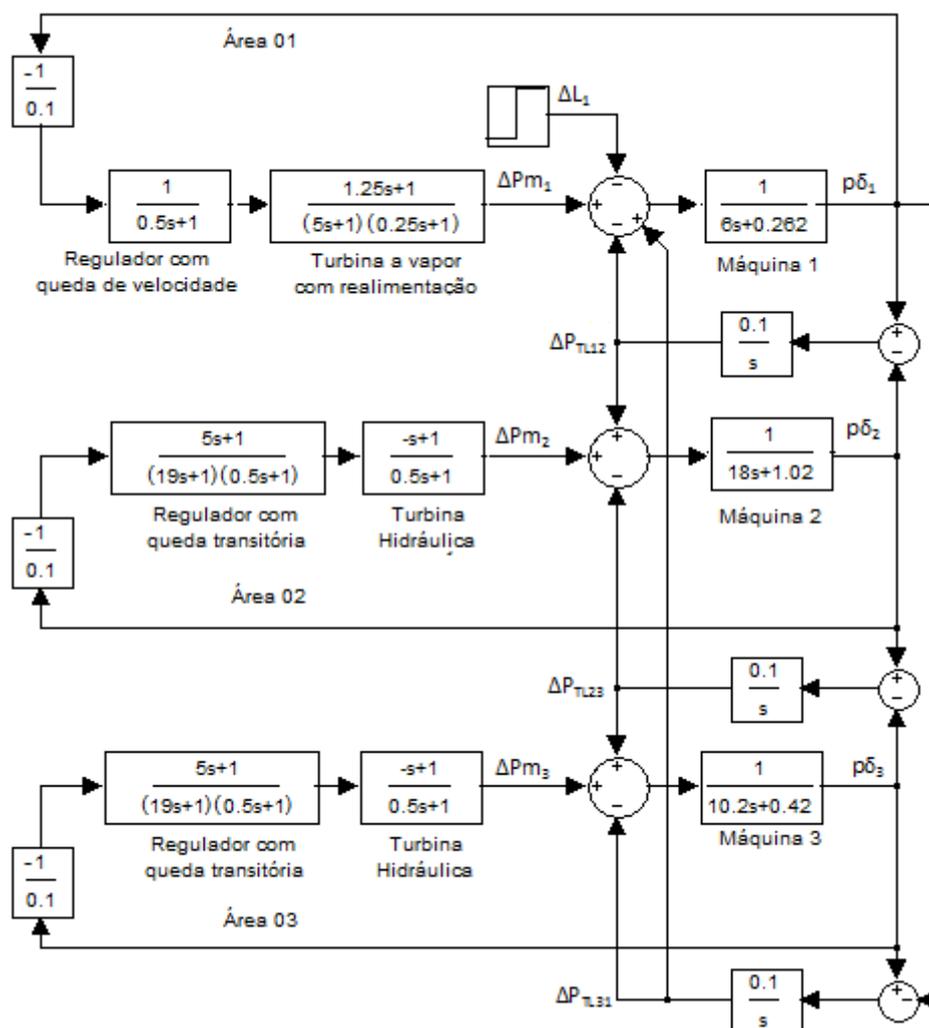
Após o desenvolvimento e dedução da equação do desvio de frequência, variação da potência na linha de interligação e a variação da potência da geração, considerando as três áreas interligadas em anel e com a regulação primária em cada área, prossegue-se a simulação conforme a figura 6.29 que é o diagrama de blocos com três áreas interligadas em anel, sendo a 1ª área a usina termelétrica de Igarapé, a 2ª área a usina hidrelétrica de Nova Ponte e a 3ª área a usina hidrelétrica de Igarapava e com variação de carga apenas na área 1, conforme a Tabela II.

Utilizando o *software ScicosLab*, faz-se a simulação, das três áreas conectadas sob ação do controle primário de carga-frequência. Conforme mostrado nos dados dos três sistemas, serão utilizadas duas turbinas hidráulicas (usinas hidrelétricas de Nova Ponte e Igarapava) e uma turbina a vapor com realimentação (usina termelétrica de Igarapé). Para as

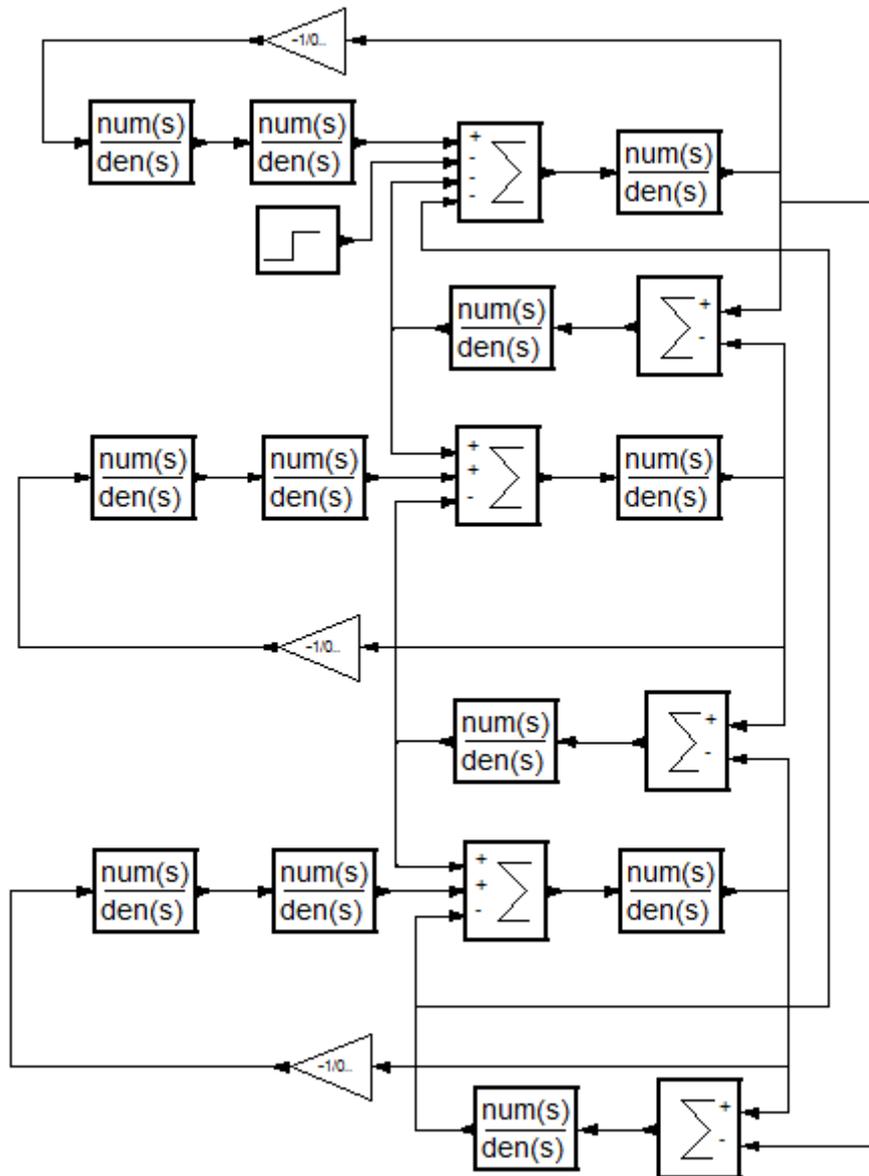
turbinas hidráulicas são utilizados reguladores de velocidade com queda transitória e para a turbina a vapor será empregado o regulador com queda de velocidade.

Os parâmetros que serão utilizados na simulação estão mostrados a seguir (estes correspondem a valores típicos).

- Turbina a vapor com reaquecimento:-  $c = 0,25$  s;  $T_r = 5$  s;  $T_s = 0,25$  s
- Turbina hidráulica:-  $T_w = 1$  s
- Regulador com queda de velocidade:-  $T_g = 0,5$  s
- Regulador com queda transitória:-  $T_r = 5$  s;  $r = 0,38$  p.u.;  $R = 0,1$  p.u.;  $T_g = 0,5$  s
- Constante de regulação dos reguladores:-  $R_1 = R_2 = R_3 = 0,1$  p.u.
- Considerar a variação da carga  $\Delta L_1 = 0,05$  p.u.;  $\Delta L_2 = 0$  e  $\Delta L_3 = 0$ , (Tabela II).



a – Diagrama de blocos convencional.



b – Diagrama de blocos do ScicosLab

Figura 6.29 – Diagrama de blocos para simulação com três áreas interligadas sob a ação do controle primário e com a variação da carga apenas na área 1.

Para ilustrar, a figura 6.30 mostra a resposta da frequência simultaneamente das três áreas interligadas conforme simulação do diagrama de blocos da figura 6.29.

Substituindo os valores na equação (6.19), o desvio de frequência em regime permanente para as três áreas interligadas com controle primário, pode ser calculado por:

$$p\delta = \frac{-0,05}{\left(\frac{1}{0,1} + 0,262\right) + \left(\frac{1}{0,1} + 1,02\right) + \left(\frac{1}{0,1} + 0,42\right)} = -0,00158 \text{ p.u}$$

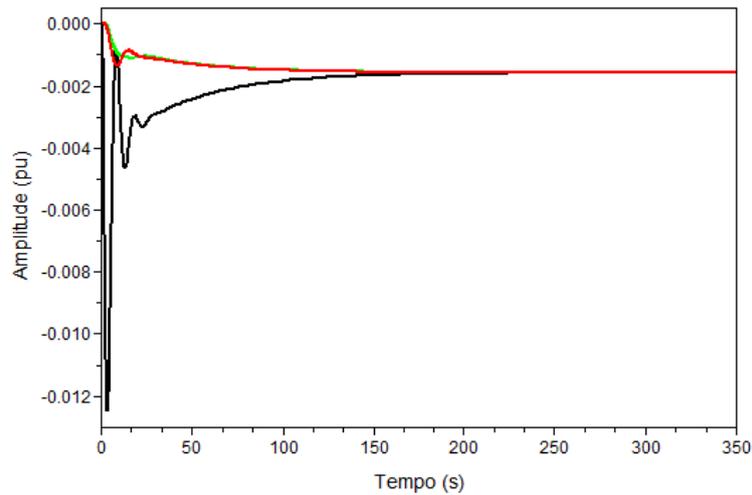


Figura 6.30 – Variação da frequência  $p\delta_1$  (preto),  $p\delta_2$  (verde) e  $p\delta_3$  (vermelho)

Observa-se que após simulação, utilizando o *software ScicosLab* o valor dos desvios está entre  $-0,001$  p.u e  $-0,002$  p.u, que condiz com o valor calculado que é  $-0,00158$  p.u em regime permanente.

O programa ScicosLab atende a expectativa da simulação.

O valor final da variação da potência na linha de interligação da área 1 com a área 2,  $\Delta P_{TL12}$  é determinado de acordo com a equação (6.21), bastando para isto substituir os respectivos valores:

$$\Delta P_{TL12} = \frac{1}{3} \left\{ \frac{-0,05[2(10 + 1,02) + (10 + 0,42)]}{(10 + 0,262) + (10 + 1,02) + (10 + 0,42)} \right\} = -0,0171 \text{ p.u}$$

O comportamento da potência na linha de interligação da área 1 com a área 2 é representado por meio da figura 6.31, mostrado a seguir:

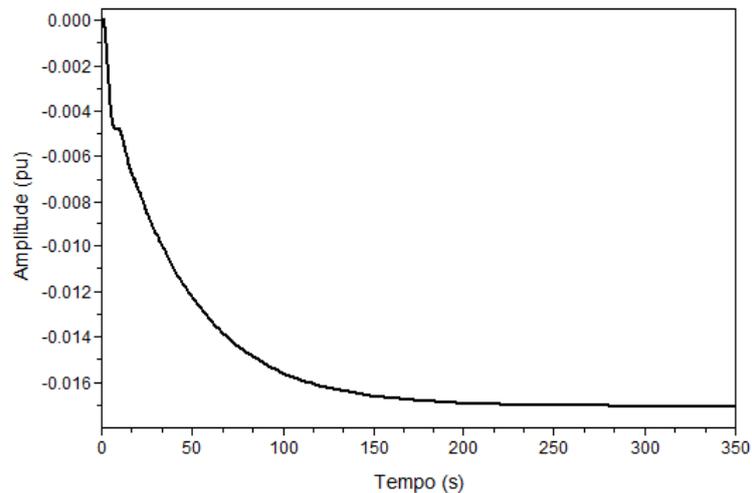


Figura 6.31 – Variação da Potência de Interligação  $\Delta P_{TL12}$ .

Observa-se que após simulação, utilizando o *software ScicosLab* o valor da variação da potência está entre  $-0,0017$  p.u e  $-0,0018$  p.u, que condiz com o valor calculado que é  $-0,00171$  p.u em regime permanente.

O valor final da variação da potência na linha de interligação da área 2 com a área 3,  $\Delta P_{TL23}$  é determinado de acordo com a equação (6.22), bastando para isto substituir os respectivos valores:

$$\Delta P_{TL23} = \frac{1}{3} \left\{ \frac{0,05[(10 + 1,02) - (10 + 0,42)]}{(10 + 0,262) + (10 + 1,02) + (10 + 0,42)} \right\} = 0,000315 \text{ p.u}$$

O comportamento da potência na linha de interligação da área 2 com a área 3 é representado por meio da figura 6.32, mostrado a seguir:

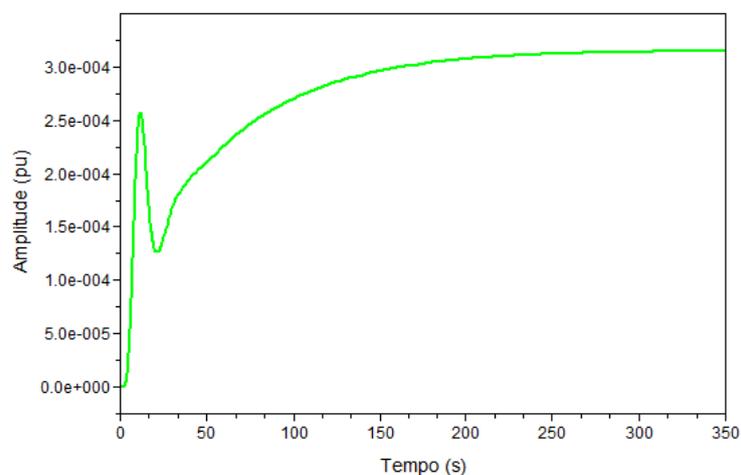


Figura 6.32 – Variação da Potência de Interligação  $\Delta P_{TL23}$ .

Observa-se que após simulação, utilizando o *software ScicosLab* o valor da variação da potência está entre + 0,0003 p.u e + 0,000325 p.u que condiz com o valor calculado que é + 0,000315 p.u em regime permanente.

O valor final da variação da potência na linha de interligação da área 3 com a área 1,  $\Delta P_{TL31}$  é determinado de acordo com a equação (6.23), bastando para isto substituir os respectivos valores:

$$\Delta P_{TL31} = \frac{1}{3} \left\{ \frac{0,05[2(10 + 0,42) + (10 + 1,02)]}{(10 + 0,262) + (10 + 1,02) + (10 + 0,42)} \right\} = 0,0167 \text{ p.u}$$

O comportamento da potência na linha de interligação da área 3 com a área 1 é representado por meio da figura 6.33, mostrado a seguir:

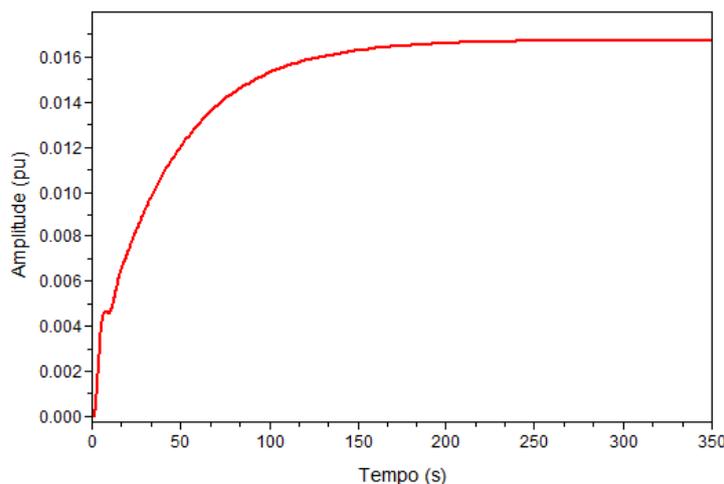


Figura 6.33 – Variação da Potência de Interligação  $\Delta P_{TL31}$

Observa-se que após simulação, utilizando o *software ScicosLab* o valor da variação da potência está entre + 0,016 p.u e + 0,017 p.u que condiz com o valor calculado que é + 0,0167 p.u em regime permanente.

Novamente o programa ScicosLab atende a expectativa da simulação nas três situações apresentadas, aproximando do valor calculado.

A figura 6.34, representa as três respostas de variação de potência, observando-se um comportamento distinto nas três linhas de interligação.

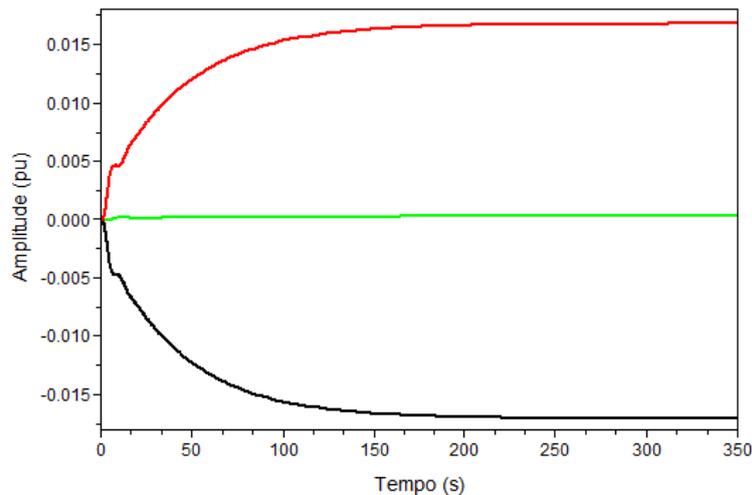


Figura 6.34 – Variação da Potência de Interligação  $\Delta P_{TL12}$  (preto),  $\Delta P_{TL23}$  (verde) e  $\Delta P_{TL31}$  (vermelho)

De acordo com as equações (6.27), (6.28) e (6.29) a variação da potência de geração em cada área pode ser calculada, substituindo os valores nas equações específicas, onde obtém-se:

$$\Delta P_{G1} = \frac{0,05 + 0 + 0}{0,1[(10 + 0,262) + (10 + 1,02) + (10 + 0,42)]} = 0,0157 \text{ p. u}$$

$$\Delta P_{G2} = \frac{0,05 + 0 + 0}{0,1[(10 + 0,262) + (10 + 1,02) + (10 + 0,42)]} = 0,0157 \text{ p. u}$$

$$\Delta P_{G3} = \frac{0,05 + 0 + 0}{0,1[(10 + 0,262) + (10 + 1,02) + (10 + 0,42)]} = 0,0157 \text{ pu}$$

Para ilustrar, a figura 6.35 atesta que a variação da potência de geração de cada área em regime permanente, após uma variação de carga indicada na Tabela II, converge para o valor calculado.

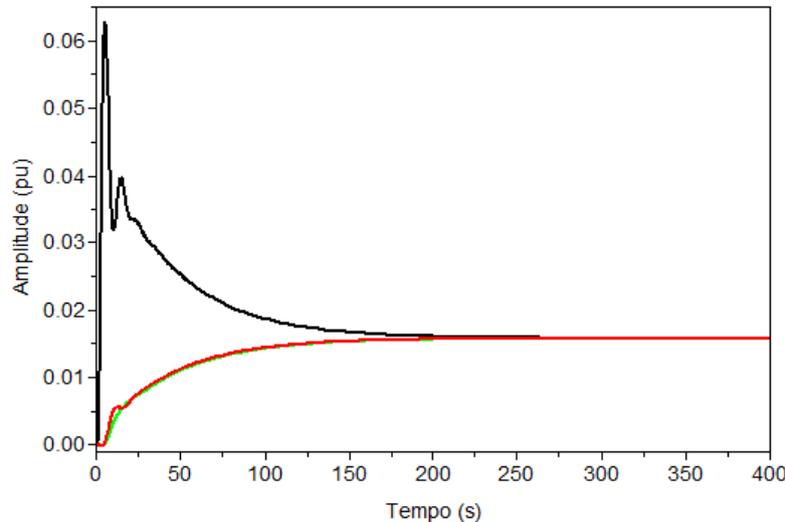


Figura 6.35 – Variação da Potência de Geração  $\Delta P_{G1}$  (preto),  $\Delta P_{G2}$  (verde) e  $\Delta P_{G3}$  (vermelho)

Observa-se que após simulação, utilizando o *software ScicosLab* o valor da variação da potência de geração está entre + 0,015 p.u e + 0,02 p.u que condiz com o valor calculado que é + 0,0157 p.u em regime permanente.

Como  $R_1 = R_2 = R_3$ , os desvios de geração são iguais nas três áreas. Além disso,  $\Delta P_{G1} + \Delta P_{G2} + \Delta P_{G3} = 0,0471$ , o que é ligeiramente diferente de  $\Delta L_1 + \Delta L_2 + \Delta L_3 = 0,05$ . Isto acontece devido ao fato de haver um erro de regime permanente na frequência de operação.

Novamente o *Software ScicosLab* mostrou que as simulações propostas foram comprovadas matematicamente.

#### 6.3.4 Caso 4: As Três Áreas Interligadas sob ação do Controle Suplementar

Visando verificar a ação do controle suplementar para as três áreas interligadas em anel, neste item será feita a simulação considerando o controle automático de geração atuando em suas respectivas áreas.

Conforme visto anteriormente, o controle suplementar tem como objetivo eliminar os desvios da frequência do sistema e das potências nas linhas de interligação das áreas, em regime permanente, para variações de carga em qualquer uma das áreas.

Visando uma análise completa, propõem-se as três áreas interligadas em anel, tendo em sua configuração o controle primário e o controle suplementar e para uma melhor

visualização considera-se a variação de carga em cada área, ou seja, área 1 usina termelétrica de Igarapé, área 2 usina hidrelétrica de Nova Ponte e a área 3 a usina hidrelétrica de Igarapava.

Além da Tabela III, nesta simulação utilizamos os seguintes parâmetros:-

- Turbina a vapor com reaquecimento:-  $c = 0,25$  s;  $T_r = 5$  s;  $T_s = 0,25$  s
- Turbina hidráulica:-  $T_w = 1$  s
- Regulador com queda de velocidade:-  $T_g = 0,5$  s
- Regulador com queda transitória:-  $T_r = 5$  s;  $r = 0,38$  p.u;  $R = 0,1$  p.u;  $T_g = 0,5$  s
- Constante de regulação dos reguladores:-  $R_1 = R_2 = R_3 = 0,1$  p.u.
- Considerar a variação da carga  $\Delta L_1 = - 0,05$  p.u;  $\Delta L_2 = + 0,2$  p.u e  $\Delta L_3 = - 0,1$  p.u.

Para os parâmetros do controle suplementar, tem-se:

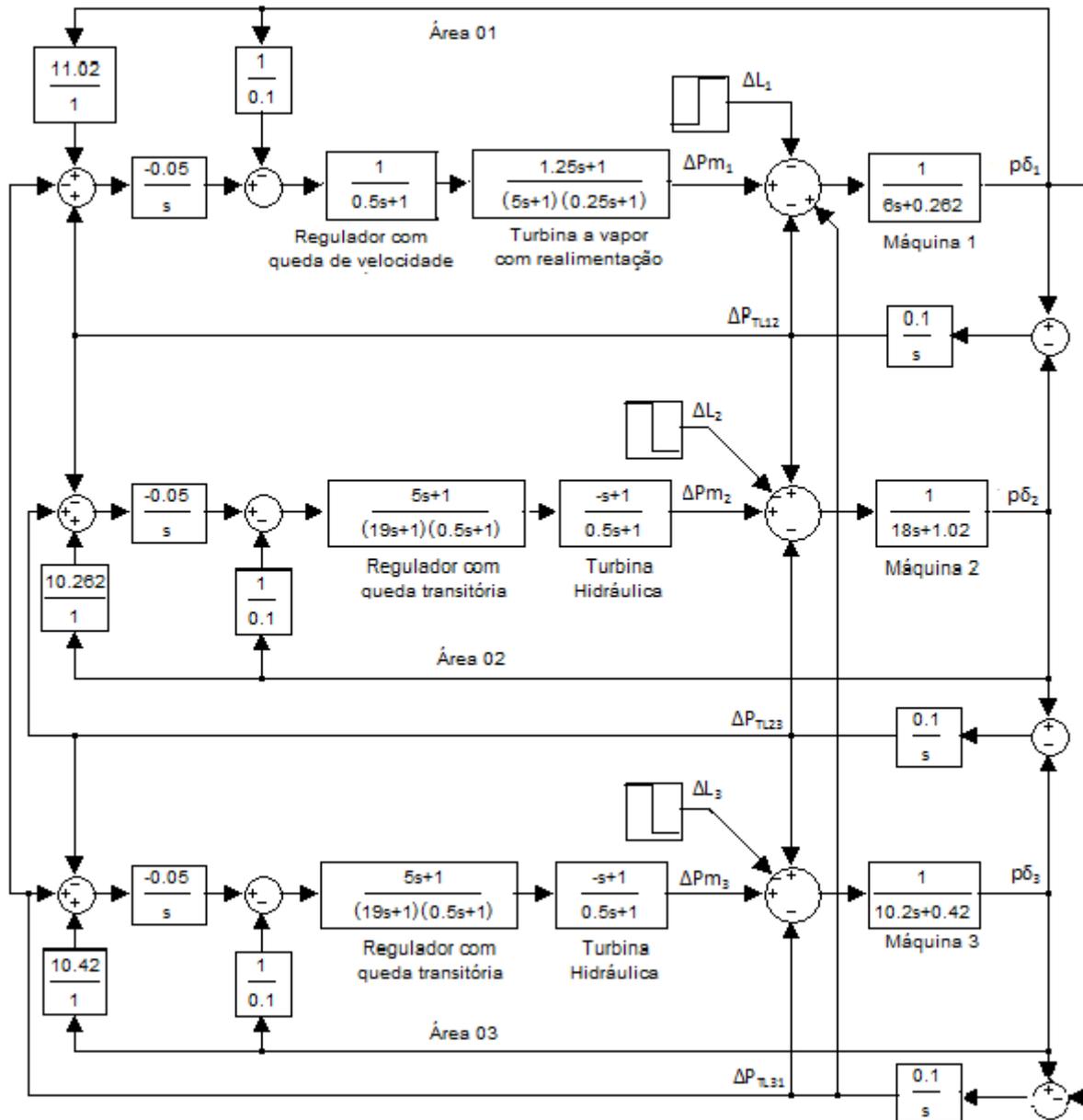
$$B_1 = \frac{1}{R_1} + D_1 = \frac{1}{0,1} + 1,02 = 11,02 \text{ p.u}$$

$$B_2 = \frac{1}{R_2} + D_2 = \frac{1}{0,1} + 0,262 = 10,262 \text{ p.u}$$

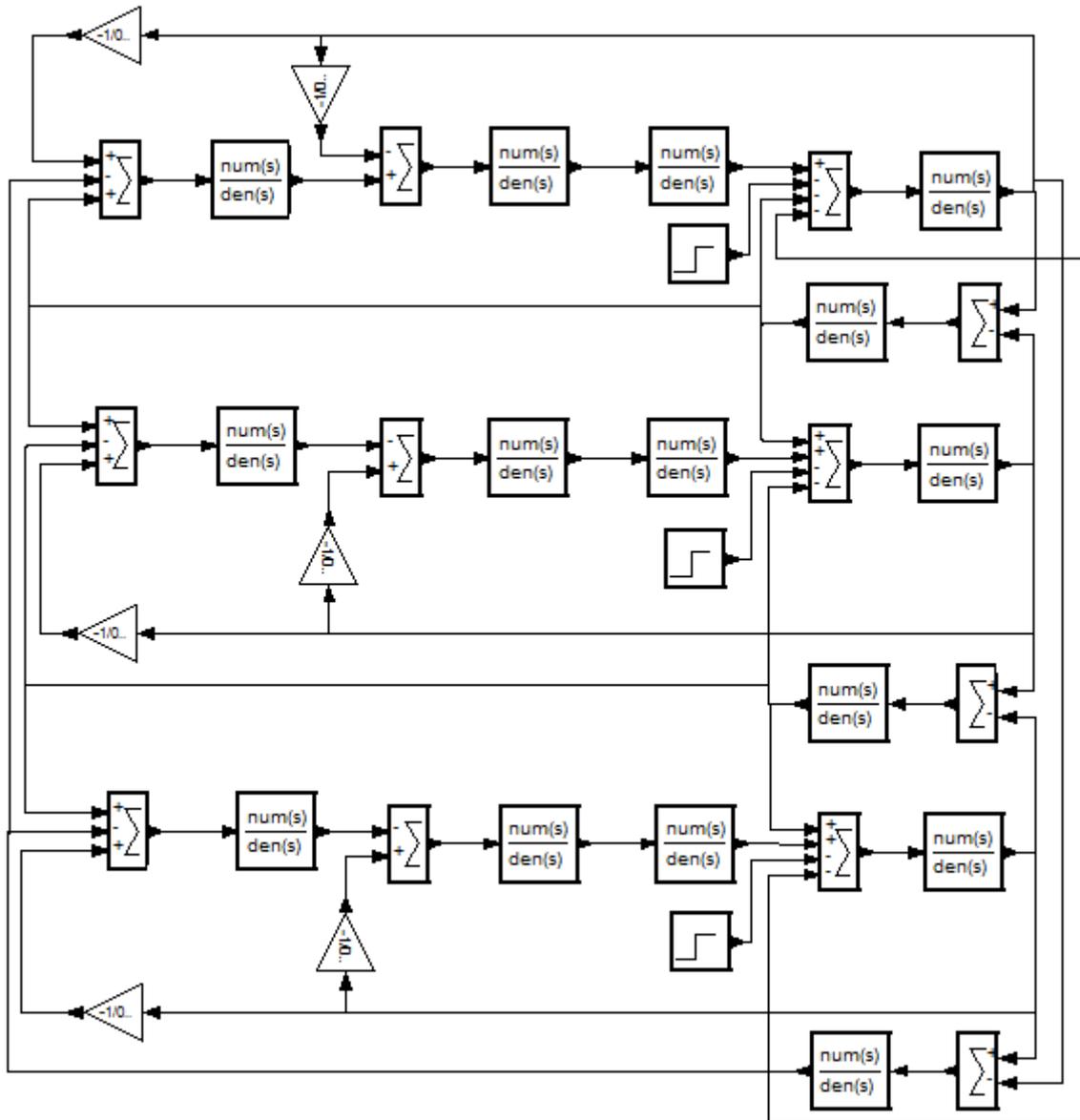
$$B_3 = \frac{1}{R_3} + D_3 = \frac{1}{0,1} + 0,42 = 10,42 \text{ p.u}$$

$$k_{f1} = k_{f2} = k_{f3} = 0,05 \text{ s/rad}$$

A figura, 6.36 mostra o diagramas de blocos das três áreas interligadas sob ação do controle suplementar.



a - Diagrama de blocos convencional.



b – Diagrama de blocos do ScicosLab

Figura 6.36 – Diagrama de blocos para simulação de três áreas interligadas sob ação do controle suplementar.

Para ilustrar, a figura 6.37 mostra a resposta da frequência simultaneamente das três áreas interligadas conforme simulação do diagrama de blocos da figura 6.36 obtidas através da equação (6.19) e do controle suplementar:.

$$p\delta_1 = p\delta_2 = p\delta_3 = p\delta = \frac{-\Delta L_1 - \Delta L_2 - \Delta L_3}{\left(\frac{1}{R_1} + D_1\right) + \left(\frac{1}{R_2} + D_2\right) + \left(\frac{1}{R_3} + D_3\right)}$$

$$p\delta_1 = p\delta_2 = p\delta_3 = p\delta = \frac{0,05 - 0,2 + 0,1}{(10 + 0,262) + (10 + 1,02) + (10 + 0,42)} = -0,00158 \text{ p.u}$$

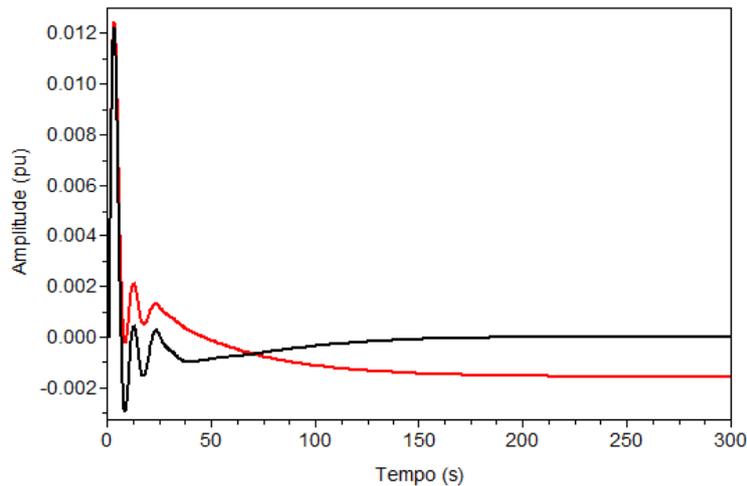


Figura 6.37 – Variação da Frequência  $p\delta_1$ , com controle suplementar (preto)

Observando a figura 6.37, constata-se que  $p\delta_1$  em regime permanente, está entre  $- 0,001$  p.u e  $- 0,002$  p.u sem controle suplementar (vermelho) e  $0,00$  p.u com controle suplementar (preto)

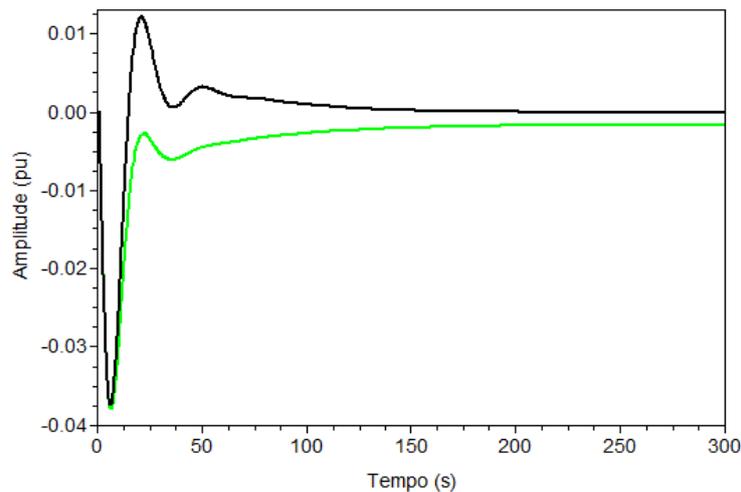


Figura 6.38 - - Variação da Frequência  $p\delta_2$ , com controle suplementar (preto)

Observando a figura 6.38, constata-se que  $p\delta_2$  em regime permanente, está entre  $- 0,00125$  p.u e  $- 0,0025$  p.u sem controle suplementar (verde) e  $0,00$  p.u com controle suplementar (preto)

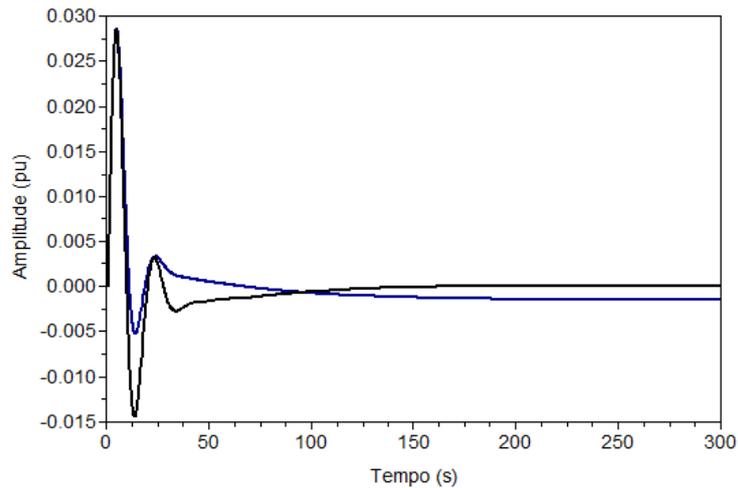


Figura 6.39 – Variação da Frequência  $p\delta_3$ , com controle suplementar (preto).

Observando a figura 6.39, constata-se que  $p\delta_3$  em regime permanente, está entre 0,000 p.u e - 0,0025 p.u sem controle suplementar (azul) e 0,00 p.u com controle suplementar (preto)

Nota-se que os valores obtidos graficamente para os desvios de frequência aproximam do valor calculado, isto é  $p\delta = - 00158$  p.u, comprova a eficiência do programa *ScicosLab*.

A figura 6.40 inclui no mesmo gráfico as três respostas de variação de frequência, observando um comportamento distinto nas três áreas.

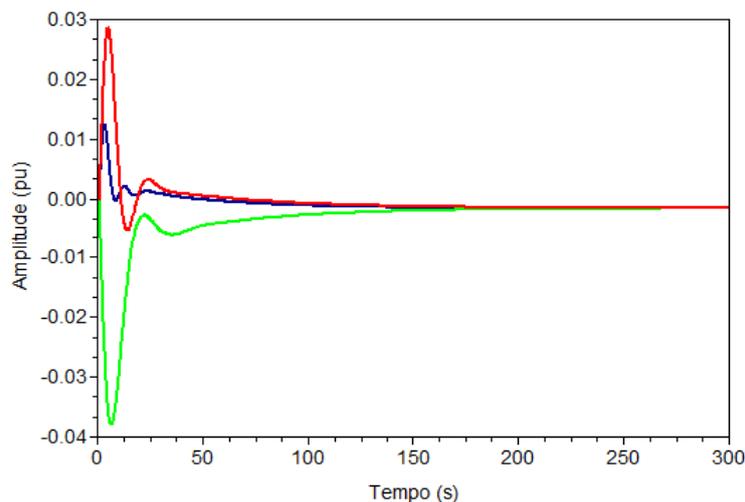


Figura 6.40 – Variação da Frequência  $p\delta_1$  (vermelho),  $p\delta_2$  (verde) e  $p\delta_3$  (azul), sem controle suplementar

Observa-se que após simulação, utilizando o *software ScicosLab* o valor dos desvios de frequência é 0,00 p.u, como esperado para a ação do controle suplementar.

Nota-se que os valores obtidos graficamente para os desvios de frequência sem controle suplementar aproximam do valor calculado, isto é  $p\delta = -0,00158$  p.u, comprovando assim a eficiência do programa *ScicosLab*.

Agora, determinam-se os valores em regime permanente da variação de potência na linha de interligação do sistema proposto e os correspondentes resultados gráficos, obtidos através do *software ScicosLab*, onde são calculados e mostrados a seguir.

O valor final da variação da potência na linha de interligação da área 1 com a área 2,  $\Delta P_{TL12}$  é determinado de acordo com a equação (6.21), bastando para isto substituir os respectivos valores:

$$\Delta P_{TL12} = \frac{1}{3} \left\{ \frac{0,05[2 \times 11,02 + 10,42] + 0,2[2 \times 10,262 + 10,42] - 0,1[10,262 - 11,02]}{(10,262) + (11,02) + (10,42)} \right\}$$

$$\Delta P_{TL12} = 0,083 \text{ p.u} \quad (\text{controle primário})$$

A figura 6.41 apresenta a simulação da variação da potência na linha de interligação,  $\Delta P_{TL12}$ .

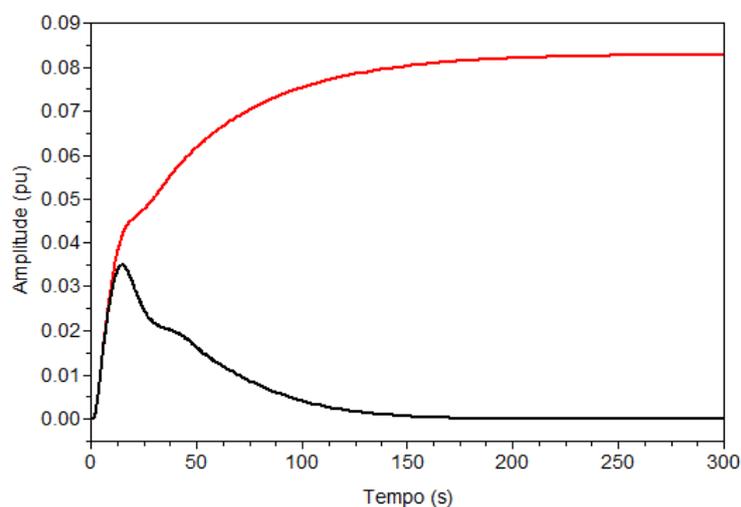


Figura 6.41 – Variação da Potencia de interligação  $\Delta P_{TL12}$ , sem controle suplementar (vermelho)

Observando a figura 6.41 os valores de  $\Delta P_{TL12}$ , sem controle suplementar (vermelho) está entre + 0,08 p.u e + 0,085 p.u e com controle suplementar (preto) é igual a 0,00 p.u, conforme o valor calculado e previsto teoricamente.

O valor final da variação da potência na linha de interligação da área 2 com a área 3,  $\Delta P_{TL23}$  é determinado de acordo com a equação (6.22), bastando para isto substituir os respectivos valores:

$$\Delta P_{TL23} = \frac{1}{3} \left\{ \frac{-0,05[11,02 - 10,42] - 0,2[2 \times 10,42 + 10,262] - 0,1[2 \times 11,02 - 10,262]}{(10,262) + (11,02) + (10,42)} \right\}$$

$$\Delta P_{TL23} = - 0,0997 \text{ p. u} \quad (\text{controle primário})$$

A figura 6.42 apresenta a Simulação da variação da potência na linha de interligação,  $\Delta P_{TL23}$ .

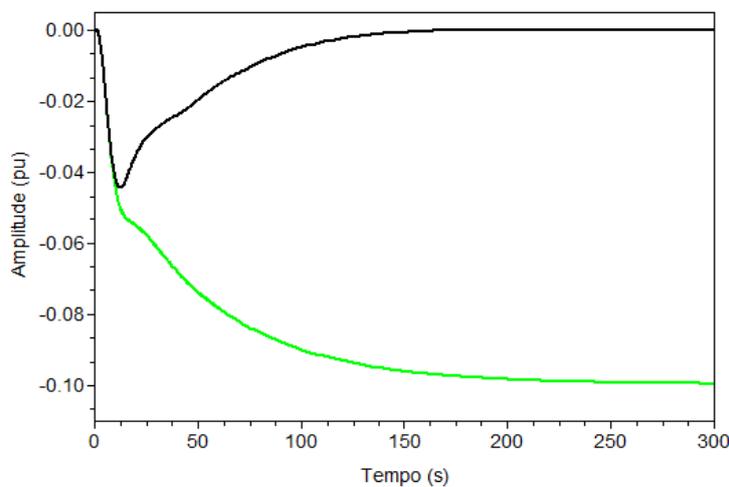


Figura 6.42 - Variação da Potencia de interligação  $\Delta P_{TL23}$ , sem controle suplementar (verde)

Observando a figura 6.42 os valores de  $\Delta P_{TL32}$ , sem controle suplementar (verde) está entre - 0,0925 p.u e - 0,010 p.u e com controle suplementar (preto) é igual a 0,00 p.u, conforme o valor calculado e previsto teoricamente.

O valor final da variação da potência na linha de interligação da área 3 com a área 1,  $\Delta P_{TL31}$  é determinado de acordo com a equação (6.23), bastando para isto substituir os respectivos valores:

$$\Delta P_{TL31} = \frac{1}{3} \left\{ \frac{-0,05[2 \times 10,42 + 11,02] + 0,2 [10,42 - 10,262] + 0,1 [2 \times 10,262 + 11,02]}{(10,262) + (11,02) + (10,42)} \right\}$$

$$\Delta P_{TL31} = 0,0167 \text{ p.u} \quad (\text{controle primário})$$

A figura 6.43 apresenta a simulação da variação da potência na linha de interligação,  $\Delta P_{TL31}$ .

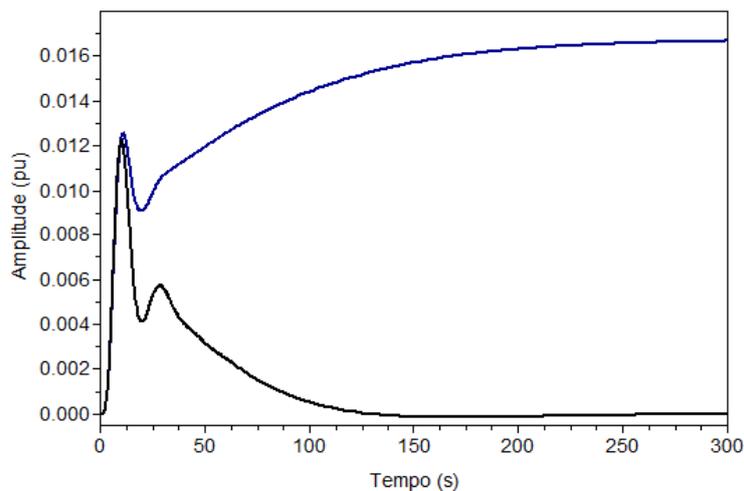


Figura 6.43 - Variação da Potencia de interligação  $\Delta P_{TL31}$ , sem controle suplementar (azul)

Observando a figura 6.43 os valores de  $\Delta P_{TL31}$ , sem controle suplementar (azul) está entre + 0,016 p.u e + 0,017 p.u e com controle suplementar (preto) é igual a 0,00 p.u, conforme o valor calculado e previsto teoricamente.

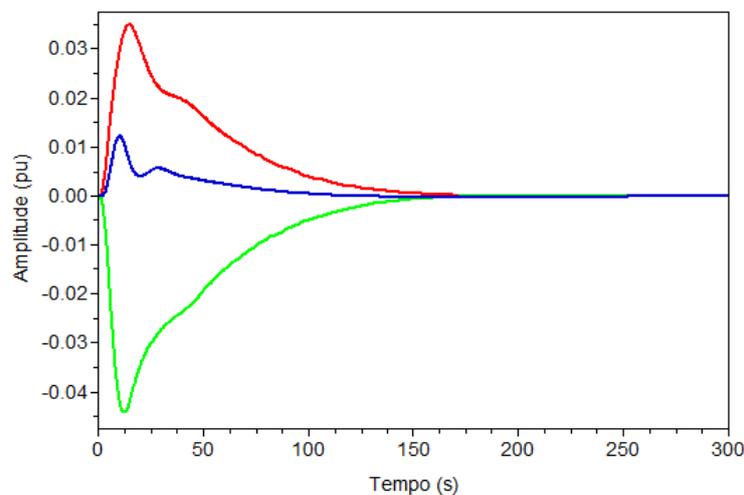


Figura 6.44 – Variação da Potência de interligação  $\Delta P_{TL12}$  (vermelho),  $\Delta P_{TL23}$  (verde) e  $\Delta P_{TL31}$  (azul), com controle suplementar

A figura 6.44 compara os três resultados,  $\Delta P_{TL12}$  (vermelho),  $\Delta P_{TL23}$  (verde) e  $\Delta P_{TL31}$  (azul), visualmente levando-os para 0,00 p.u em regime permanente como previsto para o sistema com controle suplementar, mostrando assim, a eficiência do *ScicosLab* na simulação

Novamente, uma análise completa, propõe as três áreas interligadas, tendo na configuração o controle primário e o controle suplementar.

Nesta simulação propõe a variação da carga apenas na área 1, ou seja, apenas na Usina termelétrica de Igarapé.

Além da Tabela II, nesta simulação são utilizados os seguintes parâmetros:-

- Turbina a vapor com reaquecimento:-  $c = 0,25$  s;  $T_r = 5$  s;  $T_s = 0,25$  s
- Turbina hidráulica:-  $T_w = 1$  s
- Regulador com queda de velocidade:-  $T_g = 0,5$  s
- Regulador com queda transitória:-  $T_r = 5$  s;  $r = 0,38$  p.u;  $R = 0,1$  p.u;  $T_g = 0,5$  s
- Constante de regulação dos reguladores:-  $R_1 = R_2 = R_3 = 0,1$  p.u.
- Considerar a variação da carga  $\Delta L_1 = 0,05$  p.u;  $\Delta L_2 = 0,0$  e  $\Delta L_3 = 0,0$

Os parâmetros para o controle suplementar são os seguintes:

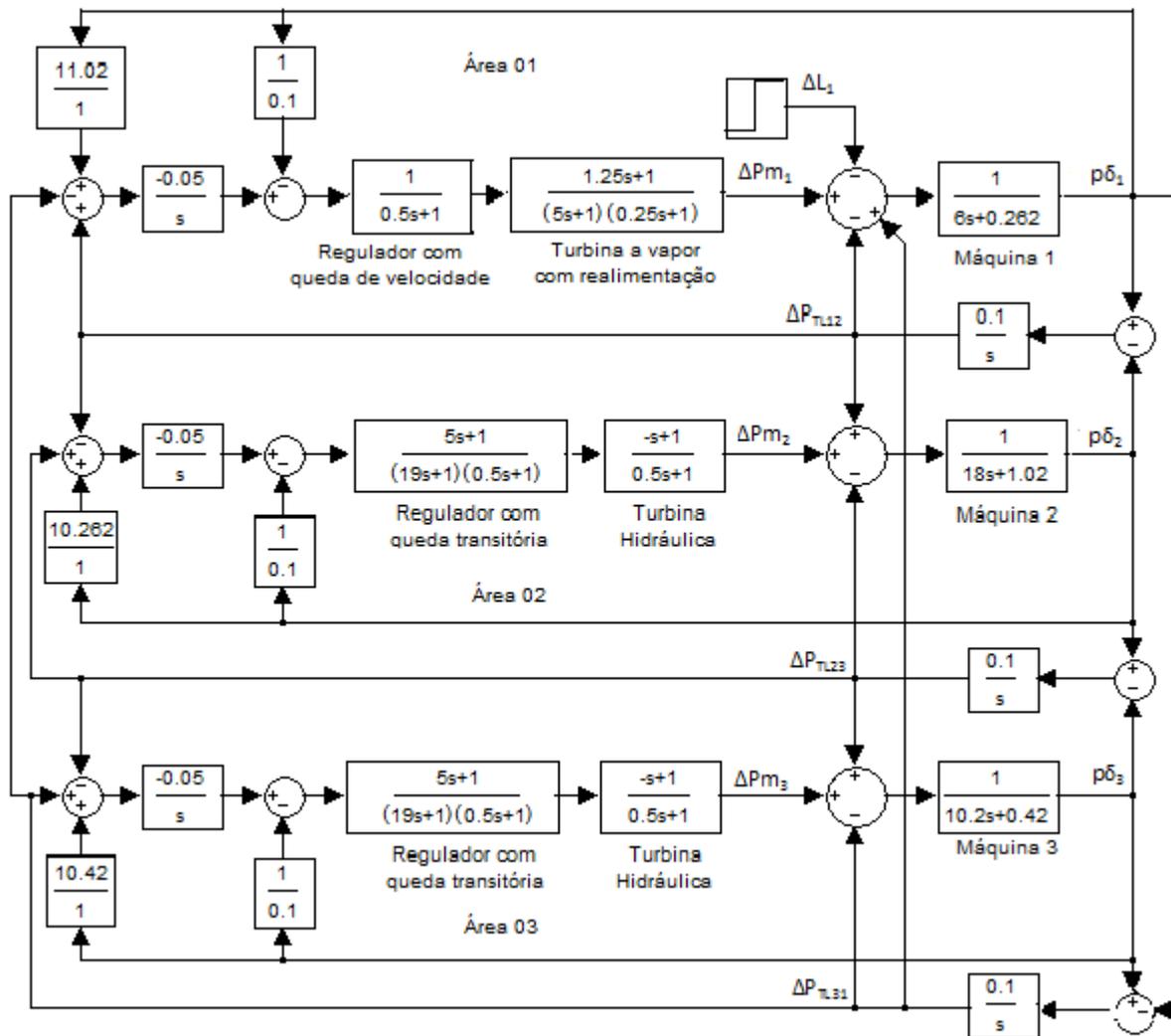
$$B_1 = \frac{1}{R_1} + D_1 = \frac{1}{0,1} + 1,02 = 11,02 \text{ p.u}$$

$$B_2 = \frac{1}{R_2} + D_2 = \frac{1}{0,1} + 0,262 = 10,262 \text{ p.u}$$

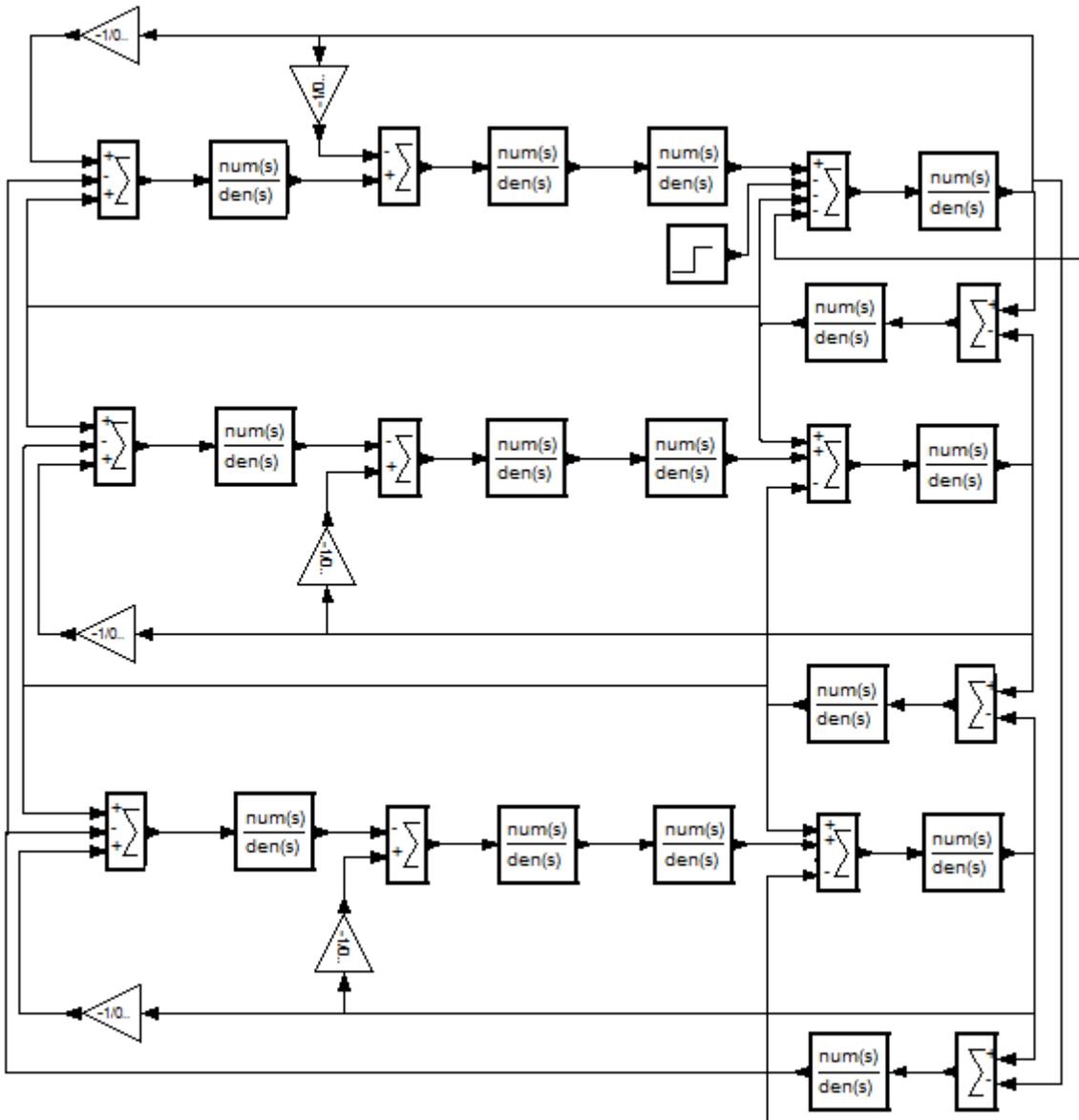
$$B_3 = \frac{1}{R_3} + D_3 = \frac{1}{0,1} + 0,42 = 10,42 \text{ p.u}$$

$$k_{f1} = k_{f2} = k_{f3} = 0,05 \text{ s/rad}$$

A figura, 6.45, mostra os diagramas de blocos das três áreas interligadas sob ação do controle suplementar.



a - Diagrama de blocos convencional



b – Diagrama de blocos do ScicosLab

Figura 6.45 – Diagrama de blocos para simulação de três áreas interligadas sob ação do controle suplementar.

Para ilustrar, sejam as figuras 6.46 a 6.49, que mostram as respostas da frequência em regime permanente do controle primário, obtidas através da equação (6.19).

Como:  $\Delta L_1 = 0,05$  pu;  $\Delta L_2 = 0$  e  $\Delta L_3 = 0$ , tem-se:

$$p\delta_1 = p\delta_2 = p\delta_3 = p\delta = \frac{-0,05}{(10 + 0,262) + (10 + 1,02) + (10 + 0,42)} = -0,00158 \text{ p.u}$$

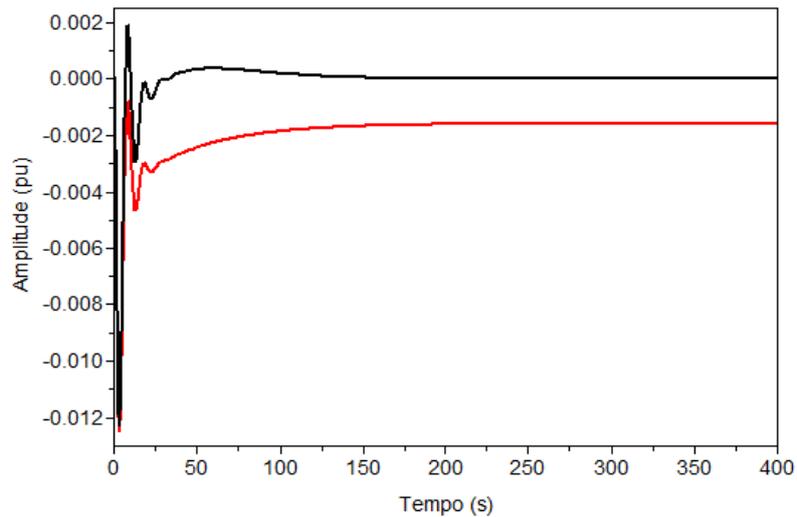


Figura 6.46 – Variação da Frequência  $p\delta_1$ , com controle suplementar (preto)

Observando a figura 6.46, constata-se que  $p\delta_1$  em regime permanente, está entre  $-0,001$  p.u e  $-0,002$  p.u sem controle suplementar (vermelho) e  $0,00$  p.u com controle suplementar (preto)

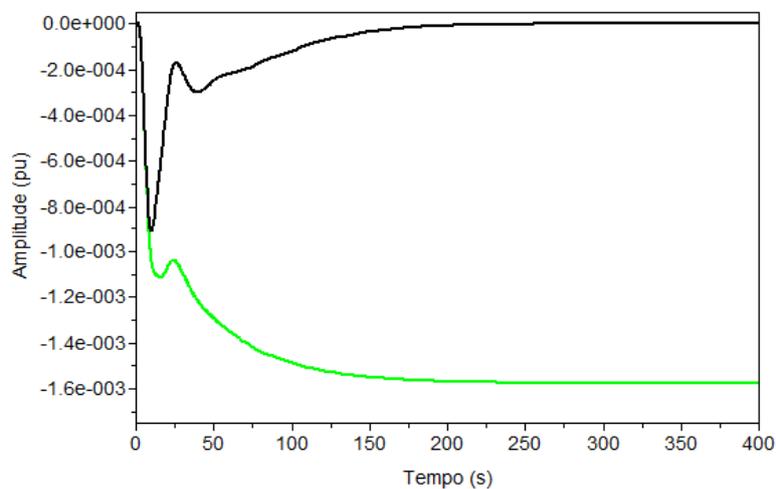


Figura 6.47 -- Variação da Frequência  $p\delta_2$ , com controle suplementar (preto)

Observando a figura 6.47, constata-se que  $p\delta_2$  em regime permanente, está entre  $-0,0015$  p.u e  $-0,0016$  p.u sem controle suplementar (verde) e  $0,00$  p.u com controle suplementar (preto)

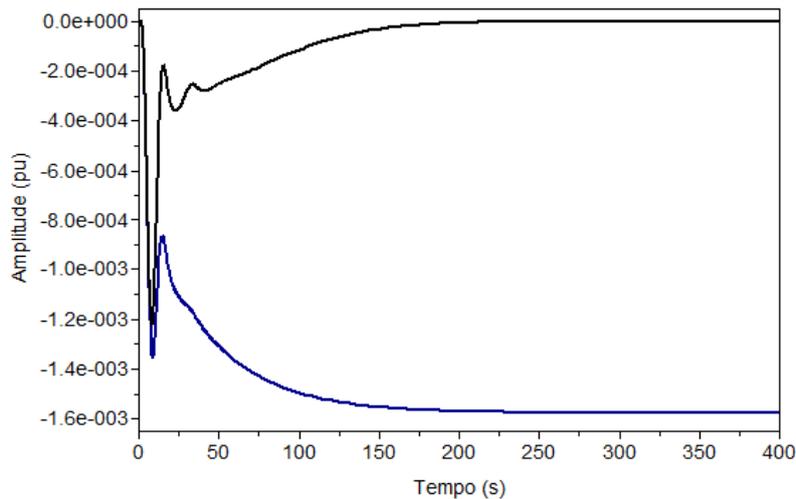


Figura 6.48 – Variação da Frequência  $p\delta_3$ , com controle suplementar (preto).

Observando a figura 6.48, constata-se que  $p\delta_3$  em regime permanente, está entre  $-0,0015$  p.u e  $-0,0016$  p.u sem controle suplementar (azul) e  $0,00$  p.u com controle suplementar (preto)

A figura 6.49 compara os três resultados obtidos, no regime permanente os desvio de frequência encontra-se entre  $-0,001$  p.u e  $-0,002$  p.u.

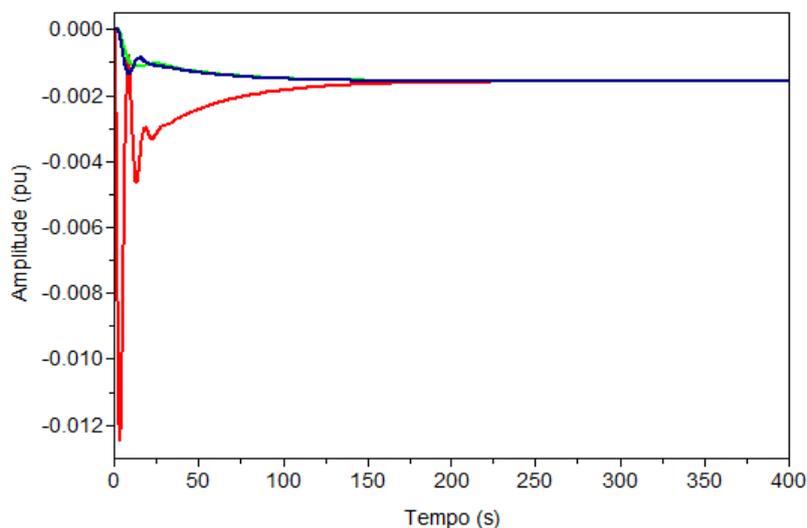


Figura 6.49 – Variação da Frequência  $p\delta_1$  (vermelho),  $p\delta_2$  (verde) e  $p\delta_3$  (azul), sem controle suplementar

Nota-se que os valores obtidos graficamente para os desvios de frequência aproximam do valor calculado, isto é  $p\delta = -0,00158$  p.u, comprova a eficiência do programa *ScicosLab*.

Agora, são determinadas as variações finais de potência das linhas de interligação do sistema proposto, com os resultados gráficos obtidos através do *software ScicosLab* mostrados em seguida, de forma a permitir uma avaliação.

Calculo da variação da potência entre a área 1 e a área 2,  $\Delta P_{TL12}$ , através da equação (6.21).

$$\Delta P_{TL12} = \frac{1}{3} \left\{ \frac{-0,05[2 \times 11,02 + 10,42]}{(10,262) + (11,02) + (10,42)} \right\} = -0,0171 \text{ p.u (controle primário)}$$

A figura 6.50 apresenta a simulação da variação da potência na linha de interligação,  $\Delta P_{TL12}$ .

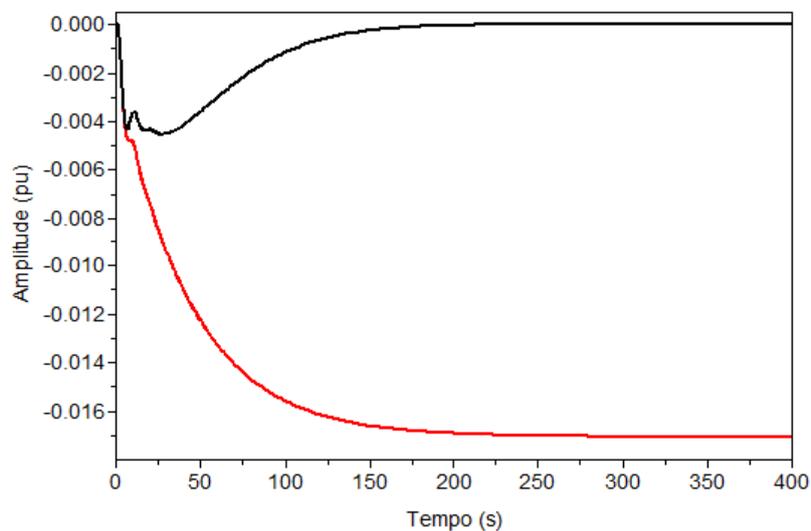


Figura 6.50 – Variação da Potencia de interligação  $\Delta P_{TL12}$ , sem controle suplementar (vermelho)

Observando a figura 6.50 os valores de  $\Delta P_{TL12}$ , sem controle suplementar (vermelho) está entre - 0,017 p.u e - 0,018 p.u e com controle suplementar (preto) é igual a 0,00 p.u, conforme o valor calculado e previsto teoricamente.

Calculo da variação da potência entre a área 2 e a área 3,  $\Delta P_{TL23}$ , através da equação (6.22).

$$\Delta P_{TL23} = \frac{1}{3} \left\{ \frac{(0,05[11,02 - 10,42])}{(10,262) + (11,02) + (10,42)} \right\} = 0,000315 \text{ p.u (controle primário)}$$

A figura 6.51 apresenta a simulação da variação da potência na linha de interligação,  $\Delta P_{TL23}$ .

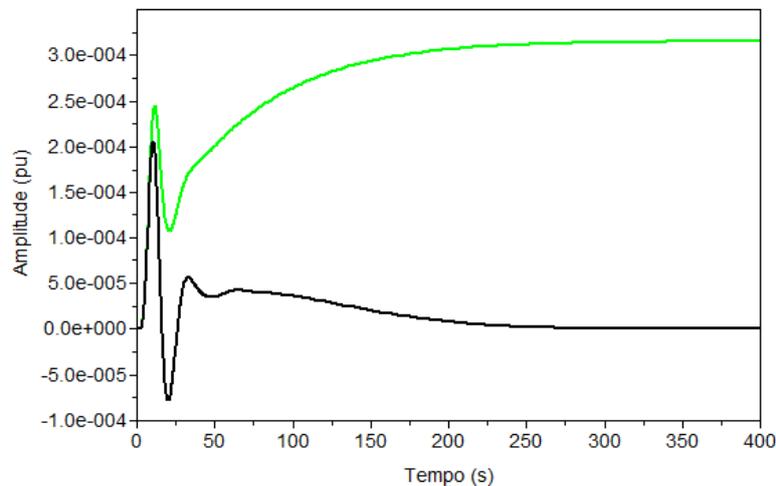


Figura 6.51 - Variação da Potencia de interligação  $\Delta P_{TL23}$ , sem controle suplementar (verde)

Observando a figura 6.51 os valores de  $\Delta P_{TL32}$ , sem controle suplementar (verde) está entre + 0,0003 p.u e + 0,000325 p.u e com controle suplementar (preto) é igual a 0,00 p.u, conforme o valor calculado e previsto teoricamente.

Calculo da variação da potência entre a área 3 e a área 1,  $\Delta P_{TL31}$ , através da equação (6.23)

$$\Delta P_{TL31} = \frac{1}{3} \left\{ \frac{0,05[2 \times 10,42 + 11,02]}{(10,262) + (11,02) + (10,42)} \right\} = 0,0167 \text{ p.u} \quad (\text{controle primário})$$

A figura 6.52 apresenta a simulação da variação da potência na linha de interligação,  $\Delta P_{TL31}$ .

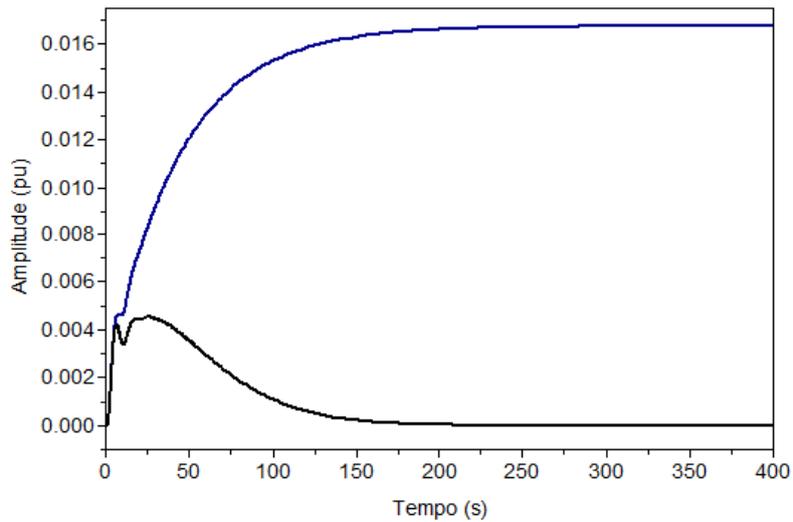


Figura 6.52 - Variação da Potência de interligação  $\Delta P_{TL31}$ , sem controle suplementar (azul)

Observando a figura 6.52 os valores de  $\Delta P_{TL31}$ , sem controle suplementar (azul) está entre + 0,016 p.u e + 0,017 p.u e com controle suplementar (preto) é igual a 0,00 p.u., conforme o valor calculado e previsto teoricamente.

A figura 6.53 compara os três resultados obtidos.

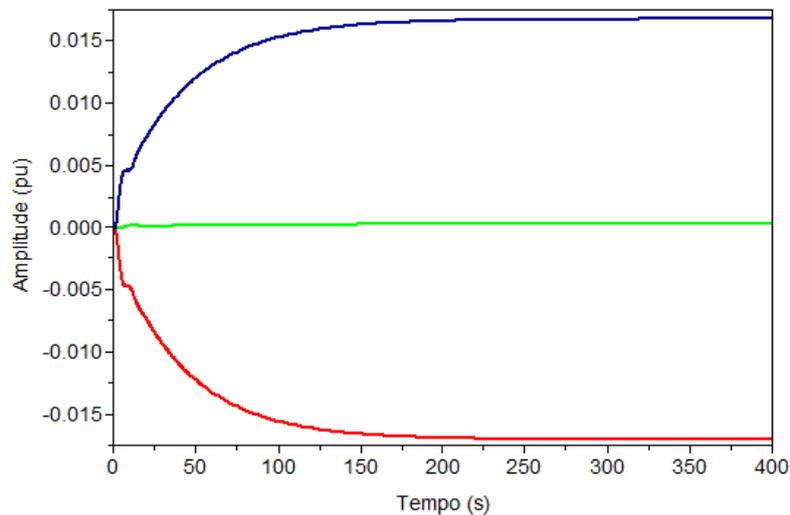


Figura 6.53 – Variação da Potência de interligação  $\Delta P_{TL12}$  (vermelho),  $\Delta P_{TL23}$  (verde) e  $\Delta P_{TL31}$  (azul), sem controle suplementar

Constatou-se, assim, que os valores obtidos graficamente no regime permanente conferem com os valores calculados matematicamente, comprovando a eficiência do *software ScicosLab*

### 6.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou a versatilidade do *software ScicosLab* para simulação da Dinâmica e Controle da Geração de Sistemas Elétricos de Potências. Para tanto foram empregados dados provenientes do sistema elétrico brasileiro para caracterização de um sistema elétrico mais realístico e um pouco mais complexo, sendo este composto de três áreas distintas, a primeira área Usina Termelétrica de Igarapé, a segunda área a Usina Hidráulica de Nova Ponte e a terceira área a Usina Hidráulica de Igarapava. Estas foram tratadas de maneira isolada e posteriormente foram interligadas de forma a resultar numa rede em anel.

Inicialmente simulou-se a influência da variação de carga em cada área isoladamente. As figuras 6.3, 6.5 e 6.7, apresentam estes resultados gráficos que permite uma comparação com a da equação (4.2).

Interligando as três áreas em anel, permitiu a simulação e obtenção dos resultados gráficos dos desvios de frequência, da variação de potência na linha de interligação e variação da potência de geração, conforme descrito a seguir:

- a) Variação da carga na área 1, sem regulação primária, figuras 6.10, 6.11 e 6.12 para os desvios de frequência e as figuras 6.14, 6.15 e 6.16 para as variações de potência nas linhas de interligação;
- b) Variação da carga nas três áreas, sem regulação primária, figuras 6.20, 6.21 e 6.22 para os desvios de frequência e as figuras 6.24, 6.25 e 6.26 para a variação de potência nas linhas de interligação;
- c) Variação da carga na área 1 e sob ação do controle primário, figura 6.30 para o desvios de frequência, as figuras 6.31, 6.32 e 6.33 a variação de potência nas linhas de interligação e a figura 6.35 a variação da potência de geração;
- d) Variação da carga nas três áreas, além do controle primário o acréscimo do controle suplementar, as figuras 6.37, 6.38 e 6.39 para os desvios de frequência e as figuras 6.41, 6.42 e 6.43 a variação da potência nas linhas de interligação;
- e) Variação da carga área 1, além do controle primário o acréscimo do controle suplementar, as figuras 6.46, 6.47 e 6.48 para os desvios de frequência e as figuras 6.50, 6.51 e 6.52 a variação da potência nas linhas de interligação.

Em todos os casos simulados, foram analisados os desvios de frequência nas áreas e os desvios de potência das linhas de interligação, sendo os valores de regime permanente calculados para efeito de avaliação de resultados.

Pode-se afirmar que os resultados gráficos foram compatíveis com os valores teóricos de regime permanente. Assim, o objetivo principal deste trabalho foi cumprido, permitindo confirmar a eficácia do *software ScicosLab* para realização de simulações computacionais da dinâmica e controle da geração de qualquer sistema elétrico, seja este isolado ou composto por diversas áreas interligadas.

## Capítulo VII

# CONCLUSÃO

Inicialmente os conceitos e definições de movimentos rotativos na Geração de Energia Elétrica, foram apresentados por integrais ou por equações diferenciais lineares e que convenientemente manuseados através das Transformadas de Laplace permitem o desenvolvimento no domínio da frequência da dinâmica de sistemas elétricos.

A análise, utilizando os modelos matemáticos, foi apresentada inicialmente com o sistema operando sem nenhum tipo de controle. Em seguida foi incorporado o controle primário realizado por reguladores de velocidade, e, por fim, foi adicionado o controle automático de geração ou controle suplementar, utilizando, para tanto, uma área com turbina a vapor e duas áreas com turbina hidráulica.

Várias simulações de variação de carga, seja somente na área com turbina a vapor interligada às outras duas áreas com turbinas hidráulicas, sejam nas três áreas, sendo estas isoladas ou interligadas, permitiram compreender a importância do controle automático de geração (CAG). Como observado, este possibilita manter a frequência e/ou as potências das linhas de interligação entre áreas de sistemas elétricos de potência em seus valores programados, garantindo, desta forma, o equilíbrio contínuo entre carga e geração.

O *software ScicosLab* mostrou-se extremamente eficiente nas análises realizadas, demandando pouco esforço computacional para efetuar os cálculos de diversos parâmetros de um sistema relativamente complexo, demonstrando a eficácia do programa para análise de sistemas dinâmicos no domínio da frequência.

A eficiência do *ScicosLab* pode ser constatada também ao comparar os resultados gráficos das simulações aqui obtidas com os resultados realizados com emprego do *MatLab/Simulink*, o qual é extremamente respeitado nos meios acadêmicos.

Ressalta-se, no entanto, que a ferramenta computacional empregada no trabalho pode ser conseguida livremente enquanto que o *MatLab* exige o dispêndio financeiro para obter

licença para sua utilização. Considerando todos estes fatos e tendo em vista objetivos semelhantes aos propostos aqui, este trabalho permite afirmar com segurança que o *software ScicosLab* representa uma excelente alternativa para substituir programas similares que exigem o pagamento de licenças para sua utilização.

Como proposta para incrementar as investigações desta pesquisa, sugere-se a incorporação no controle carga-frequência dos aspectos econômicos de um sistema elétrico de potência. Como exemplo, poderão ser considerados os custos característicos das gerações térmicas e hidráulicas disponíveis para atendimento de uma determinada solicitação de demanda de carga.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [01] S. L. Campbel, J. Chancelier, e R. Nikoukhah, Modeling and Simulation in Scicoslab/Scicos with ScicosLab 4.4, vol 2. New York; Springer, 2010, p.5-7 e p.159-162
- [02] ScicosLab. [www.scicoslab.org](http://www.scicoslab.org), 2010.
- [03] Guimarães, G. C. Análise da Dinâmica e Controle da Geração de Sistemas Elétricos de Potência, Material Didático, FEELT/UFU, 2009
- [04] Wood, A. J; Wollenberg, B. F. Power Generation, Operation and Control. John Wiley & Sons, New York, 1984
- [05] Sauer, P.W; Pai, M.A; Power System Dynamics and Stability. Prentice Hall, 1998
- [06] Machowski, J; Bialek, J. W; Bumby, J. R; Power System Dynamics – Stability and Control. Second Edition, John Wiley & Sons, New York, 2008.
- [07] Miller, Robert H. and Malinowski, James; Power System Operation; Third Edition, McGraw-Hill, 1993.
- [08] Ferreira, R. S. Análise do Controle Automático de Geração de um Sistema Elétrico de Potência utilizando o MatLab, Monografia de Graduação, 2010, Uberlândia.
- [09] ONS. Rede de Operação Sistêmica e Regional/Local, [www.ons.org.br](http://www.ons.org.br), acesso em 2010
- [10] Mello, F. P. Dinâmica e Controle da Geração, 2ª ed Santa Maria, Editora UFMS, 1983
- [11] IEEE Power Apparatus and Systems. Standard Definition of Terms for Automatic Generation Control on Electric Power Systems, IEEE Trans. on, Vol PAS-78, pp1358-1362, Jul/Aug, 1970
- [12] SHACKSHAFT, G., “General Purpose Turbo-Alternator Model”, Proc. IEE, Vol. 110, No. 4, April 1963.
- [13]. Alves, D. A. Estudo sobre a Dinâmica e Controle de Geração em Sistemas Interligados, Dissertação de Mestrado, 1988, Campinas.
- [14] Silva, A. S; Costa, A. J. A. S., Aspectos Dinâmicos do Controle de Sistemas de Potência, Santa Catarina, Material Didático, 2005.
- [15] Guimarães, G. C. Modelagem de um Sistema Elétrico para Estudo de Estabilidade e Rejeição de Carga , Material Didático, FEELT/UFU, 2009

## **Anexo I**

# **RESULTADOS COMPARATIVOS DOS PROGRAMAS *SCICOSLAB E MATLAB/SIMULINK***

### I.1 - TRÊS ÁREAS INTERLIGADAS COM CONTROLE PRIMÁRIO

As figuras 1 a 7 mostradas nesta seção visam comprovar a semelhança dos resultados comparativos das simulações realizadas com os programas *ScicosLab* e *MatLab/Simulink* para o sistema elétrico com três áreas interligadas sob ação do controle primário.

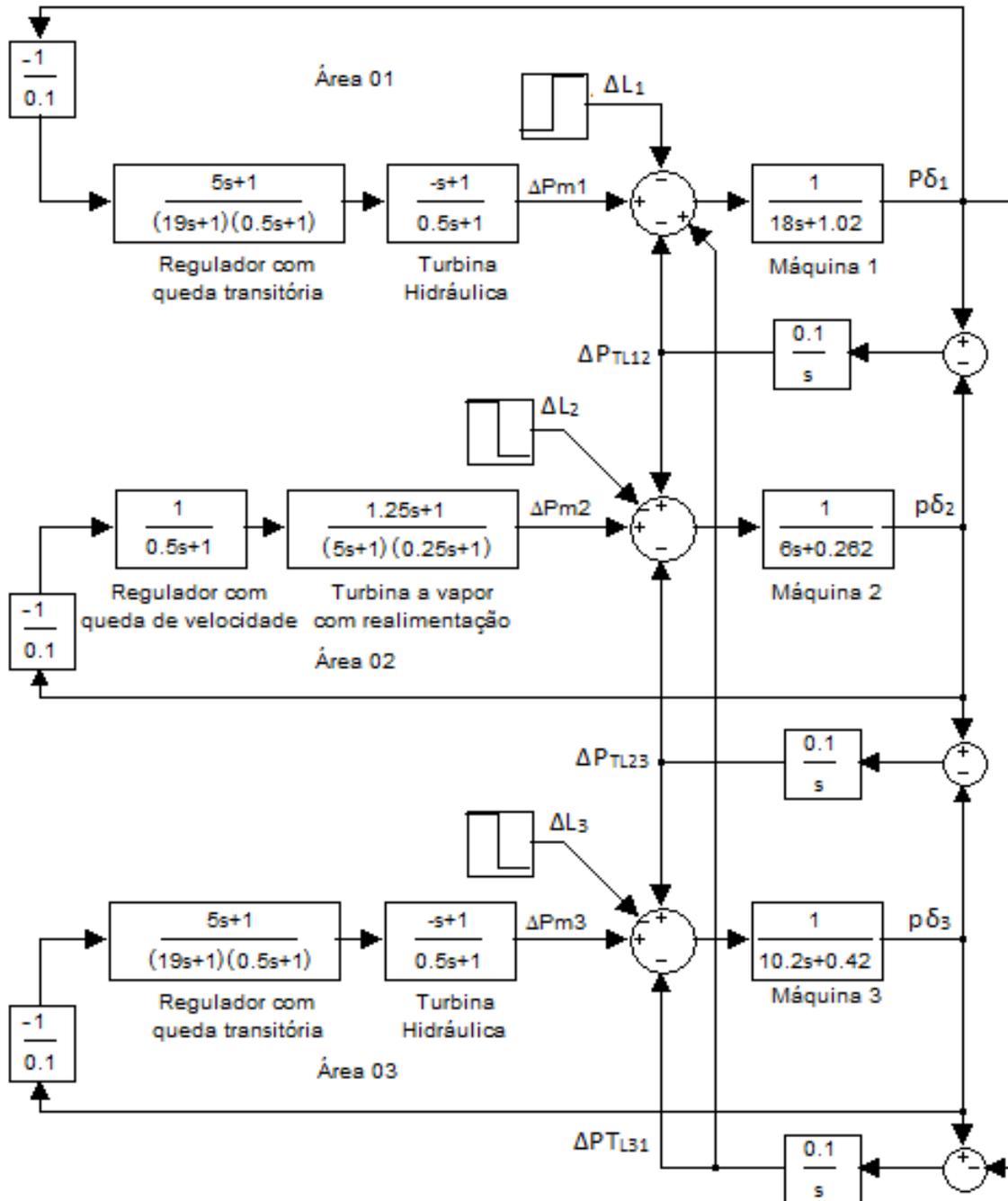


Figura 1 - Diagrama de blocos para simulação de três áreas interligadas sob ação do controle primário

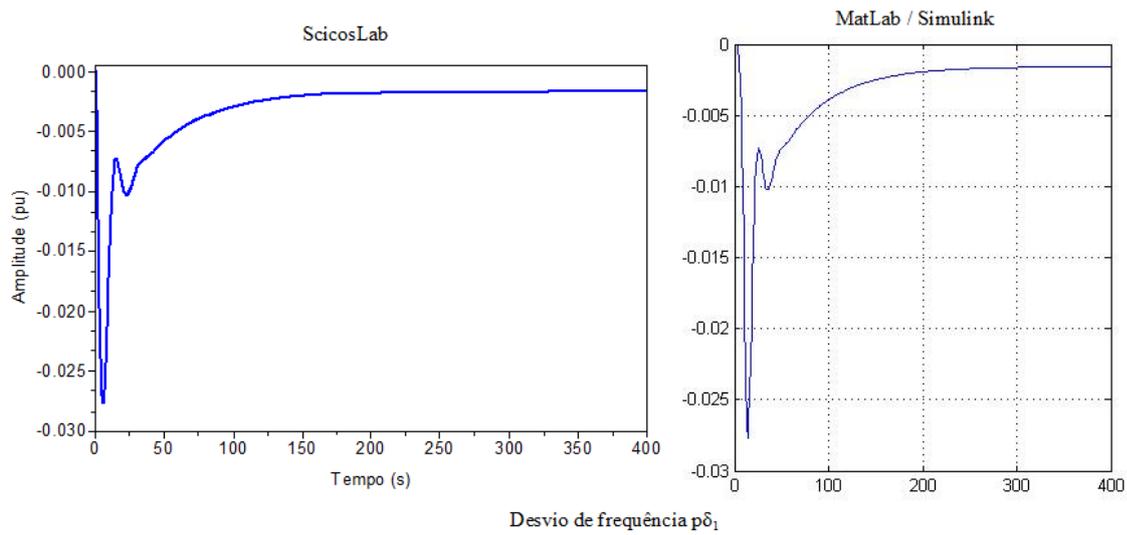


Figura 2 – Desvio de frequência da área 1,  $p\delta_1$

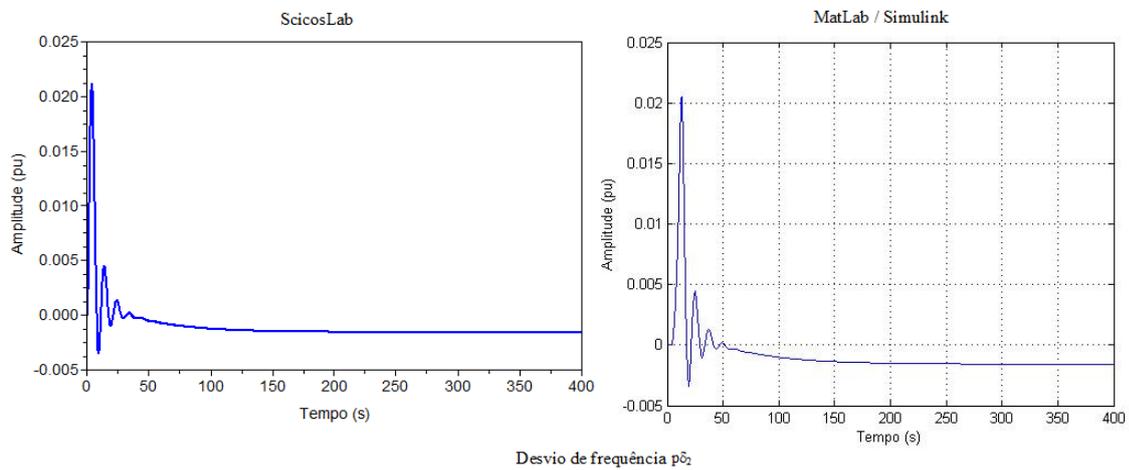


Figura 3 – Desvio de frequência da área 2,  $p\delta_2$

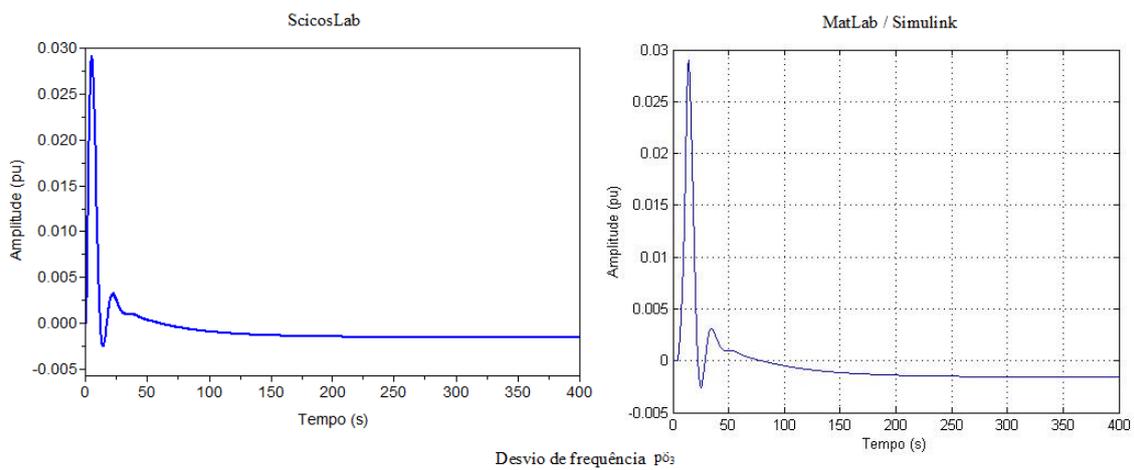


Figura 4 – Desvio de frequência da área 3,  $p\delta_3$

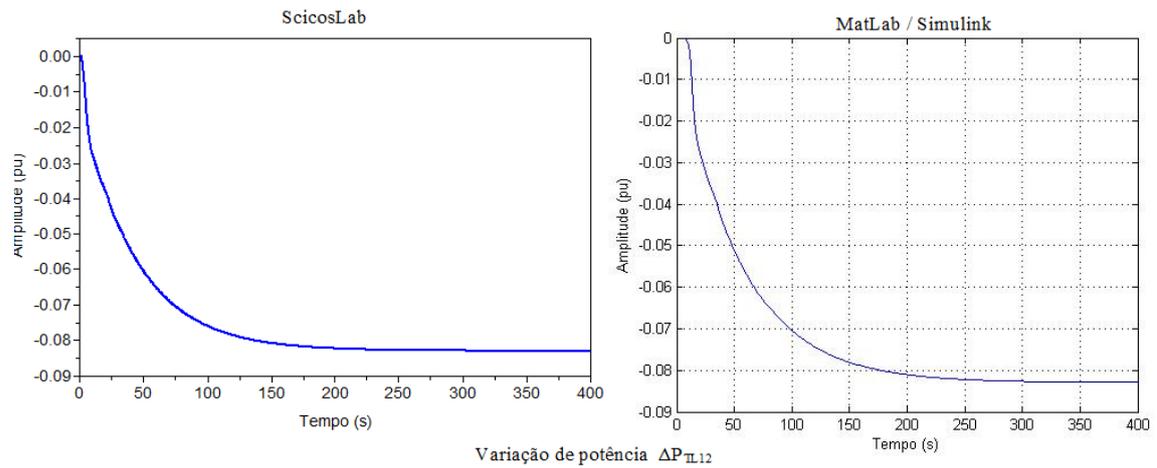


Figura 5 – Variação de potência da linha de interligação entre áreas 1 a 2,  $\Delta P_{TL12}$

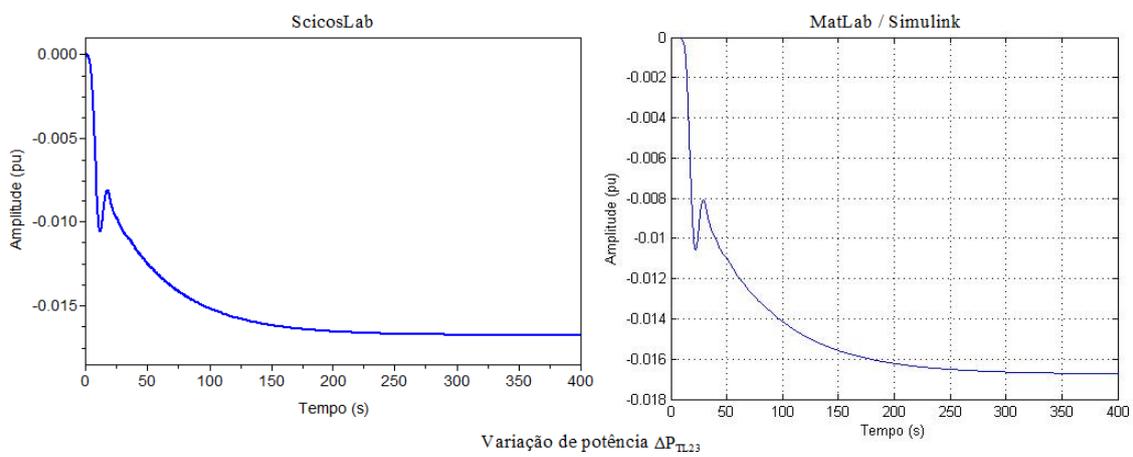


Figura 6 – Variação de potência da linha de interligação entre áreas 2 e 3,  $\Delta P_{TL23}$

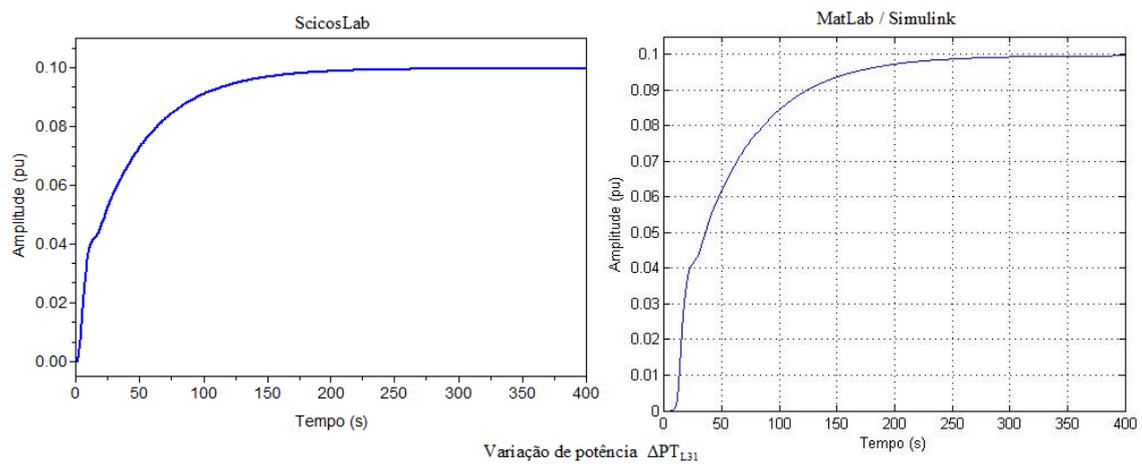


Figura 7 – Variação de potência da linha de interligação entre áreas 3 e 1,  $\Delta P_{TL31}$

## I.2 - TRÊS ÁREAS INTERLIGADAS COM CONTROLE SUPLEMENTAR

As figuras 8 a 17 mostradas nesta seção visam comprovar a semelhança dos resultados comparativos das simulações realizadas com os programas *ScicosLab* e *MatLab/Simulink* para o sistema elétrico com três áreas interligadas sob ação do controle suplementar, além de se manter o controle primário.

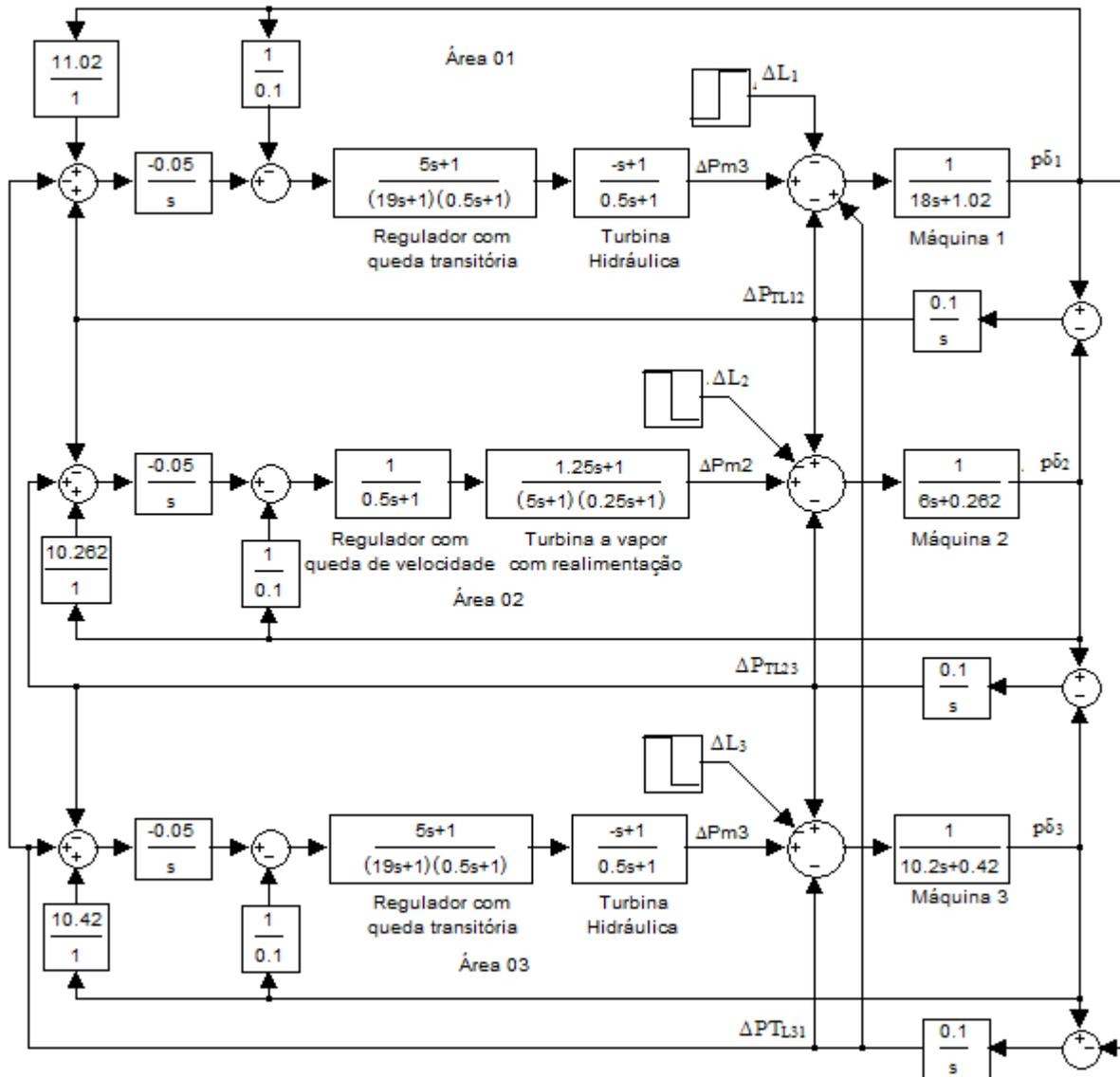


Figura 8 - Diagrama de blocos para simulação de três áreas interligadas sob ação do controle suplementar

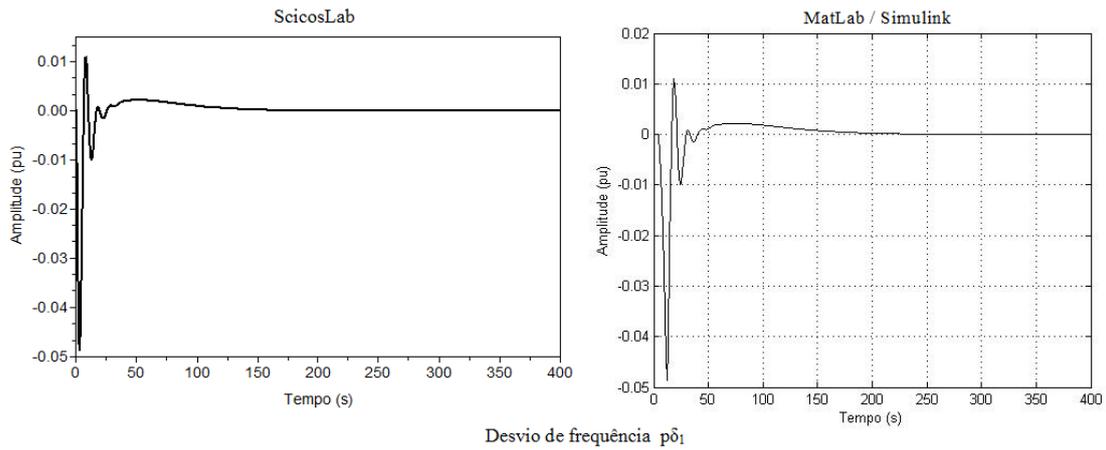


Figura 9 – Desvio de frequência da área 1,  $p\delta_1$

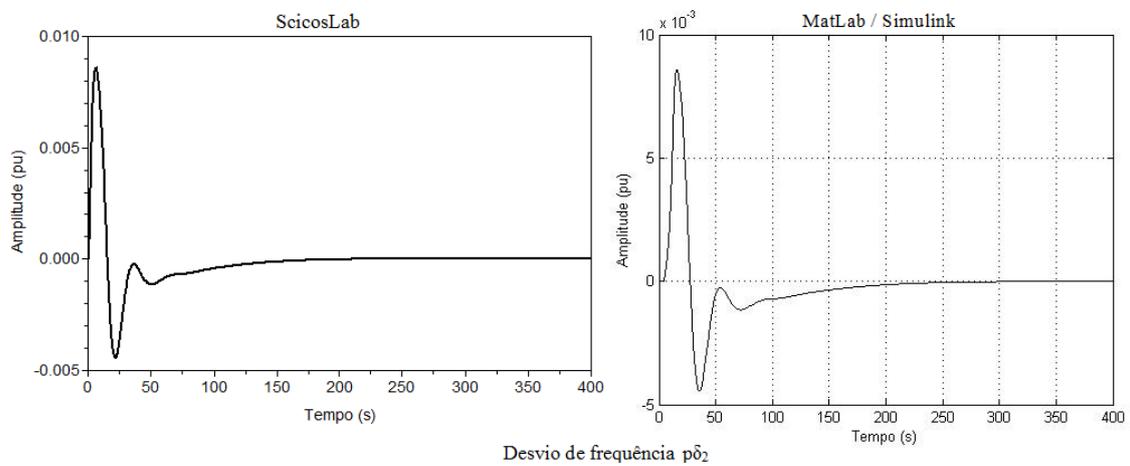


Figura 10 – Desvio de frequência da área 2,  $p\delta_2$

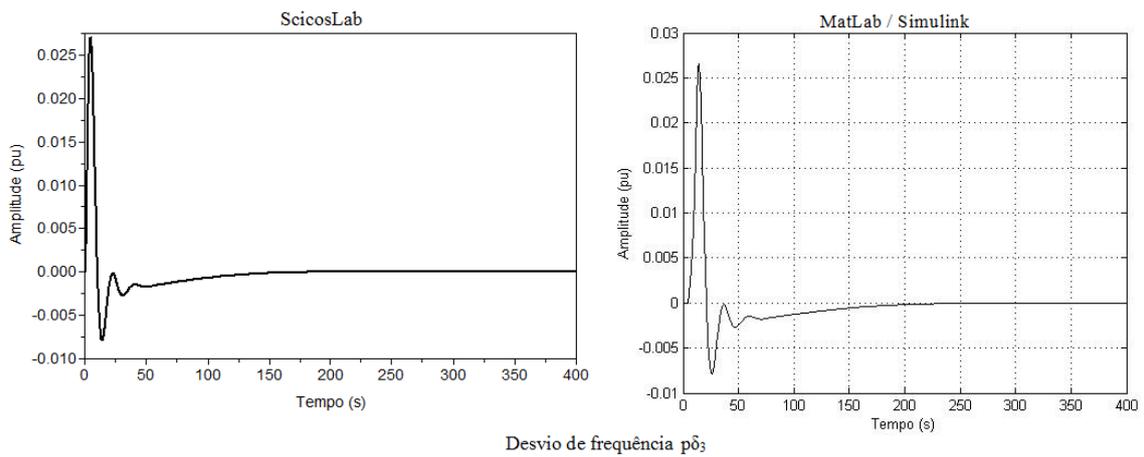


Figura 11 – Desvio de frequência da área 3,  $p\delta_3$

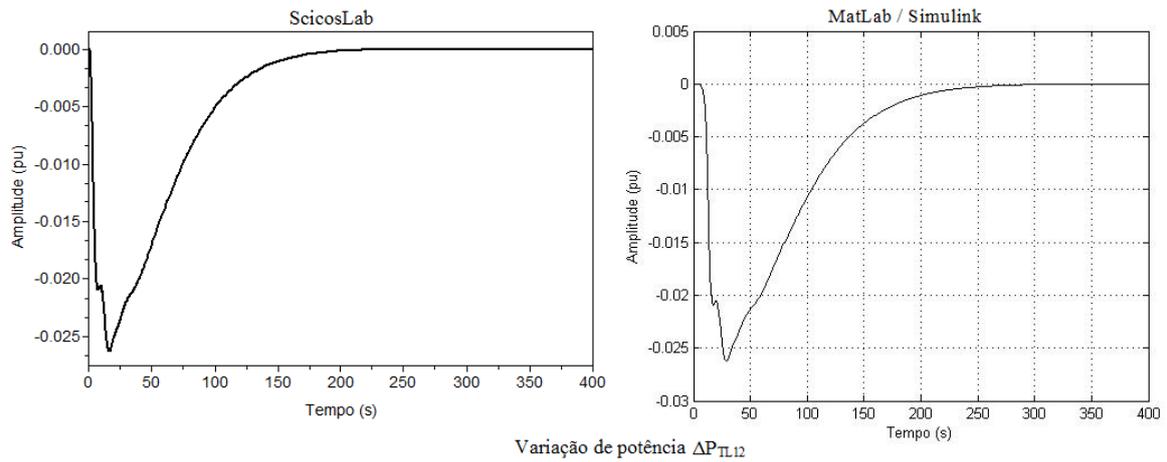


Figura 12 – Variação de potência na linha de interligação entre área 1 área 2,  $\Delta P_{TL12}$

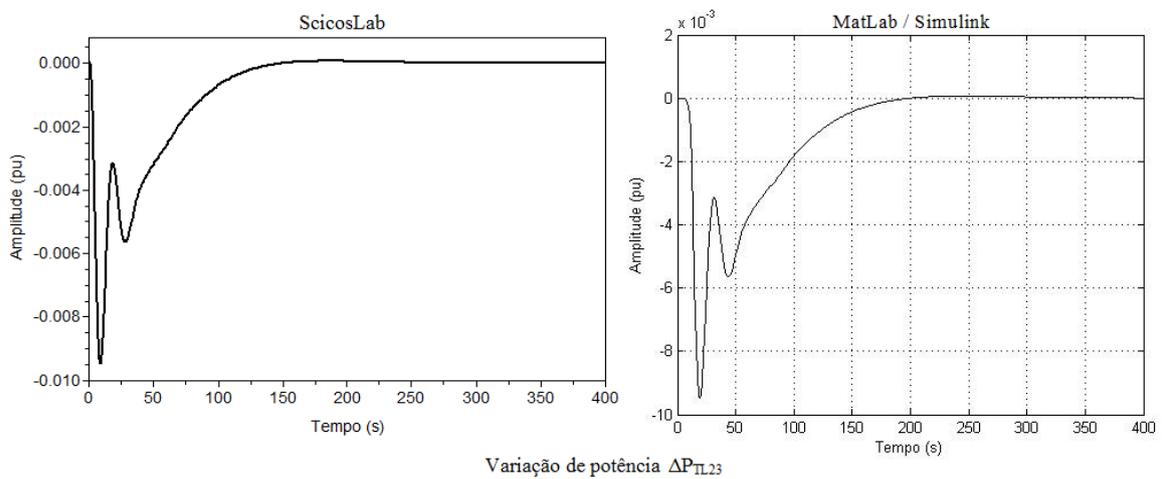


Figura 13 – Variação de potência na linha de interligação entre área 2 área 3,  $\Delta P_{TL23}$

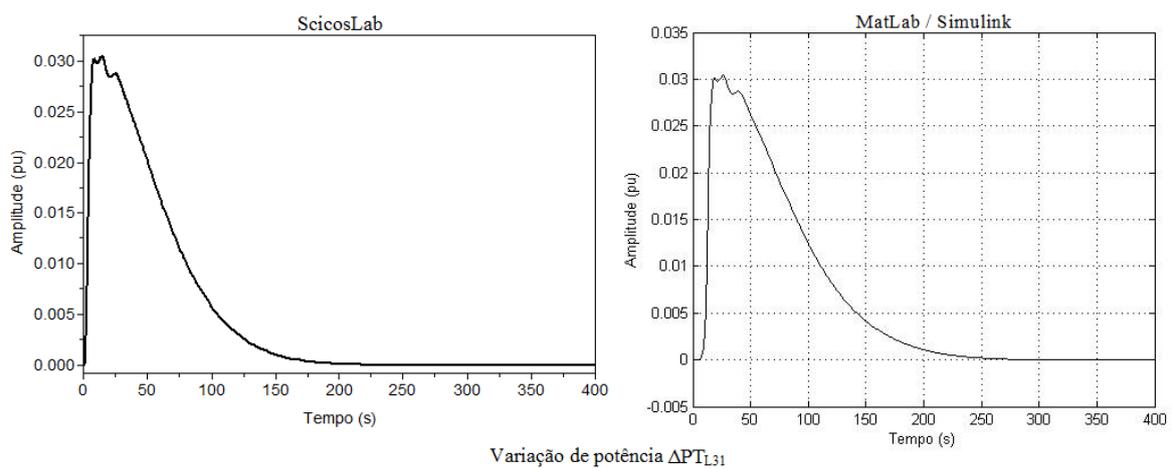
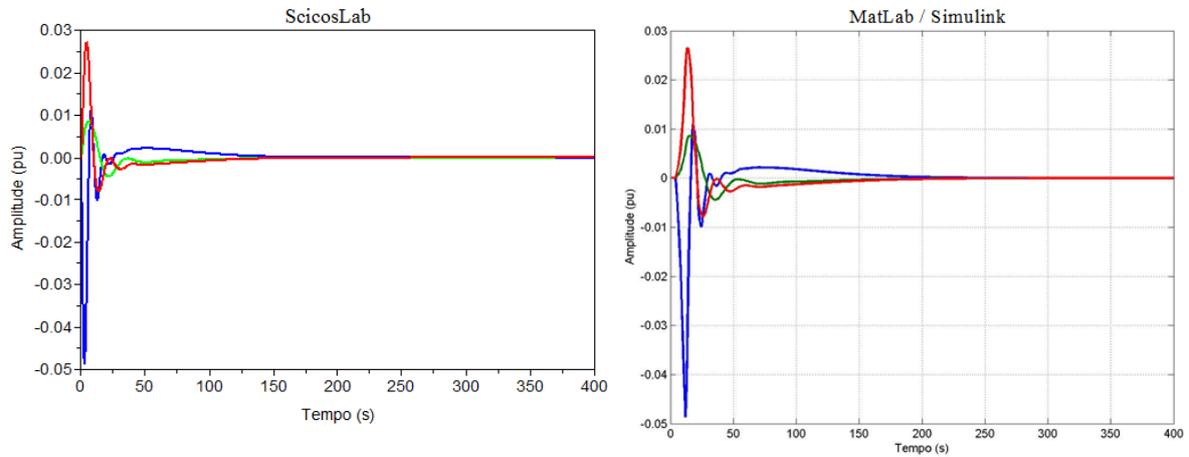
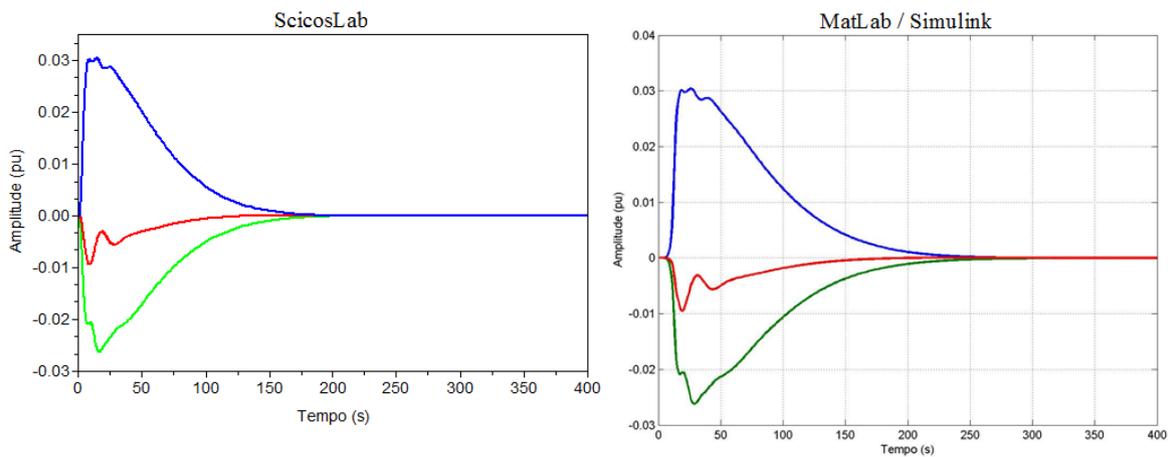


Figura 14 – Variação de potência na linha de interligação entre área 3 área 1,  $\Delta P_{TL31}$



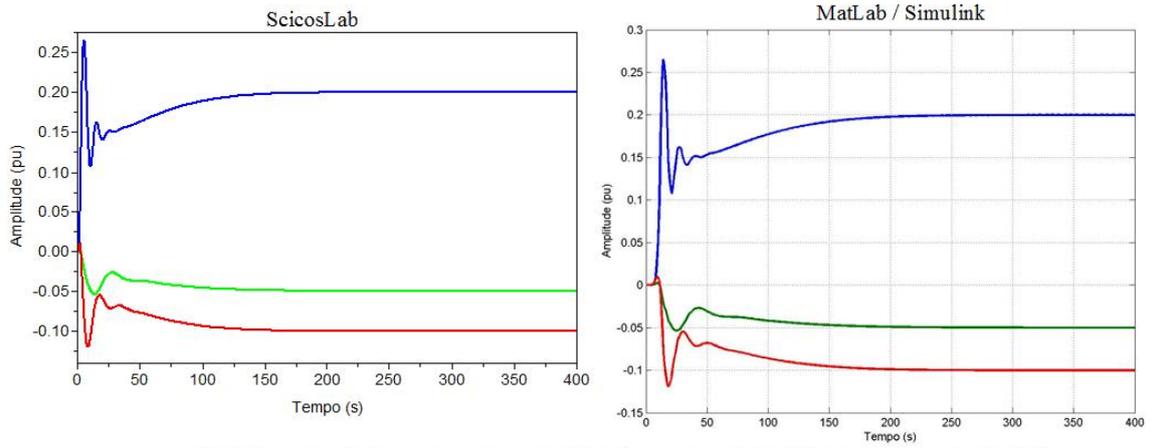
Desvio de frequência área 1 -  $p\delta_1$  (azul), área 2 -  $p\delta_2$  (verde) e área 3 -  $p\delta_3$  (azul)

Figura 15 - Desvios de frequência das áreas 1, 2 e 3:  $p\delta_1$  (azul),  $p\delta_2$  (verde) e  $p\delta_3$  (vermelho), respectivamente.



Varição de potência  $\Delta P_{TL12}$  (azul),  $\Delta P_{TL23}$  (verde) e  $\Delta P_{TL31}$  (azul)

Figura 16 – Variações de potência das linhas de interligação entre as áreas 1 e 2,  $\Delta P_{TL12}$  (azul), entre as áreas 2 e 3,  $\Delta P_{TL23}$  (verde), e entre as áreas 3 e 1,  $\Delta P_{TL31}$  (vermelho)



Varição na potência de geração – área 1  $\Delta P_{g1}$  (azul), área 2  $\Delta P_{g2}$  (verde) e área 3  $\Delta P_{g3}$  (vermelho)

Figura 17 – Variações de potência de geração das áreas 1, 2 e 3:  $\Delta P_{g1}$  (azul),  $\Delta P_{g2}$  (verde) e  $\Delta P_{g3}$  (vermelho), respectivamente.