



Reguladores de Velocidade e Regulação Primária

REGULADORAS
E·L·É·T·R·I·C·A



Controle de Freqüência - Aspectos Gerais

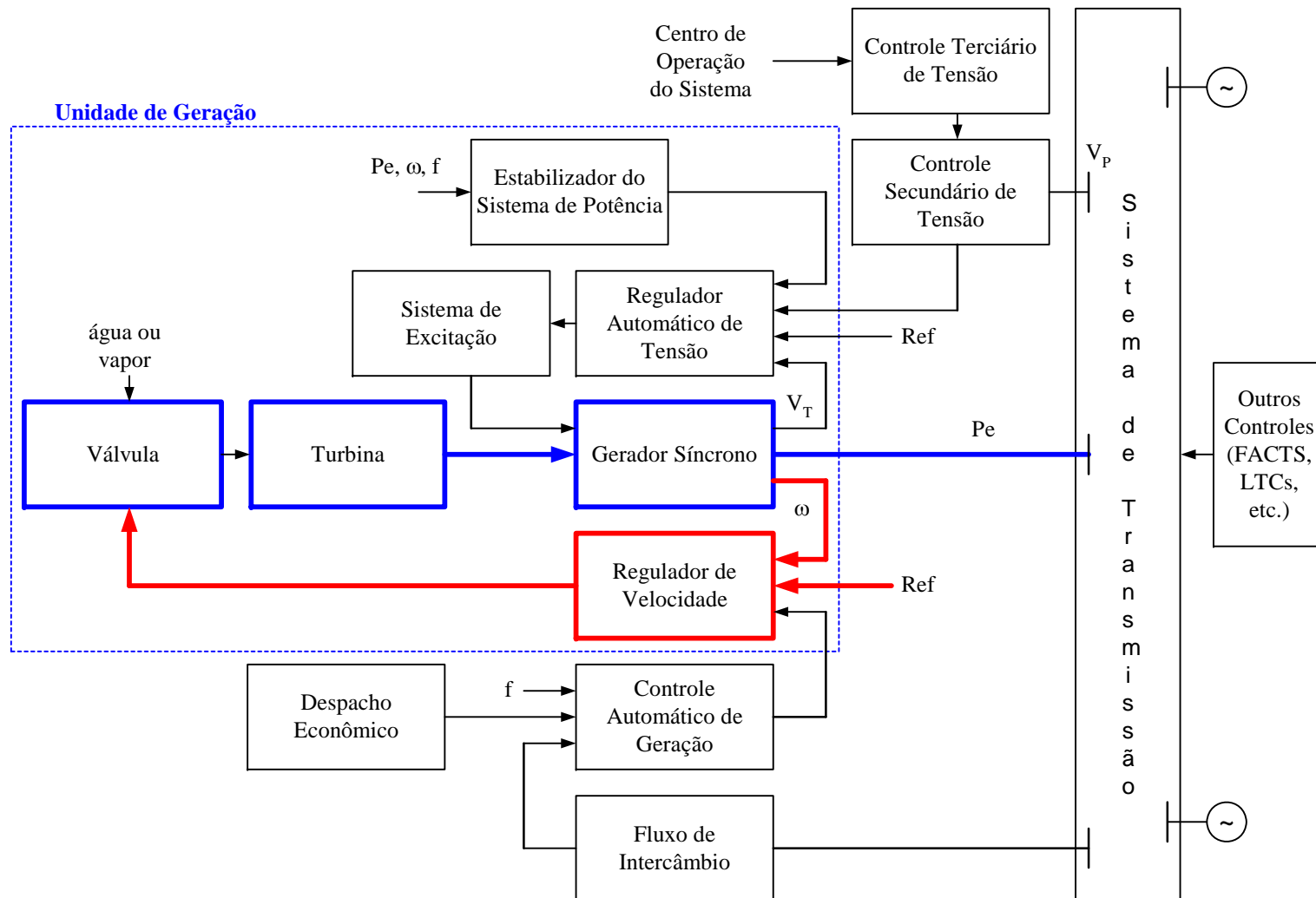
↳ Razões Principais

- ☐ Contínua variação da carga;
- ☐ Eventos não previstos (contingências);
- ☐ Requisito de Freqüência Constante;
 - » Equilíbrio entre Geração e Carga a cada instante.

↳ Ações de Controle

- ☐ Regulação Primária ou Controle de Velocidade;
 - » Reserva Instantânea (Girante) → Disponível dentro de 10 a 20 segundos.
- ☐ Regulação Secundária ou Controle Suplementar (CAG);
 - » Reserva Rápida → Disponível dentro de 1 a 10 minutos.
- ☐ Regulação Terciária;
 - » Reserva de Prontidão (*Backup*) → Disponível dentro de 30 a 60 minutos.
- ☐ Interrupção de Carga;
 - » Automática (ERACs) ou voluntária (ofertas de redução de demandas).

Controle de Freqüência - Regulação Primária



Controle de Freqüência - Regulação Primária

↙ Resposta natural de cada unidade geradora às variações de carga

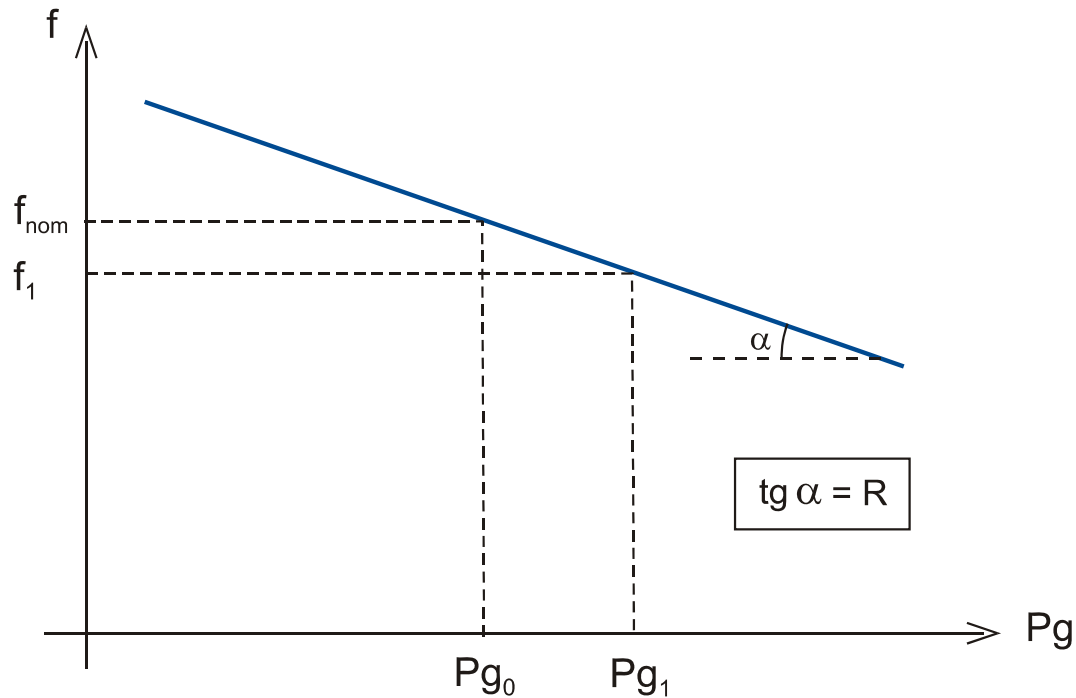
- ☐ Determinada pelas características do Regulador de Velocidade:
 - » Característica descendente – Estatismo (R);
 - » Estatismo: inverso do ganho estático da malha de controle.
- ☐ Efetiva repartição de geração entre as máquinas;
- ☐ Gerador deve estar disponível para aumentar ou diminuir a geração;

↙ Carga contribui para o equilíbrio

- ☐ Característica de variação da carga com a freqüência (D).

Característica Estática de Freqüência: Estatismo Permanente

- ↙ Determina as *características estáticas* da malha de controle:

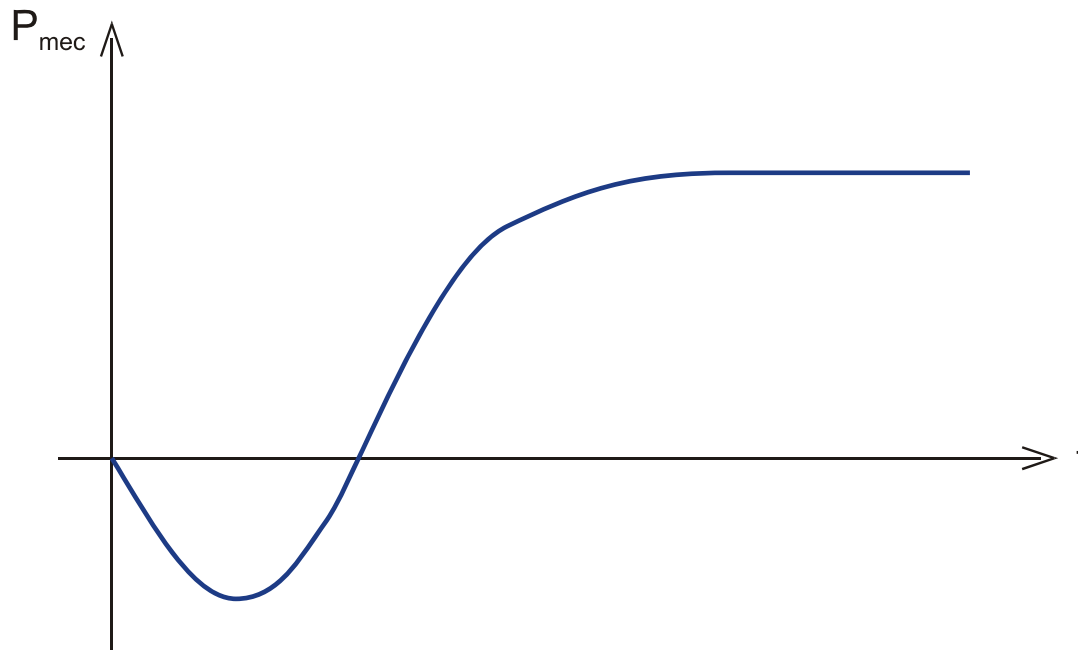
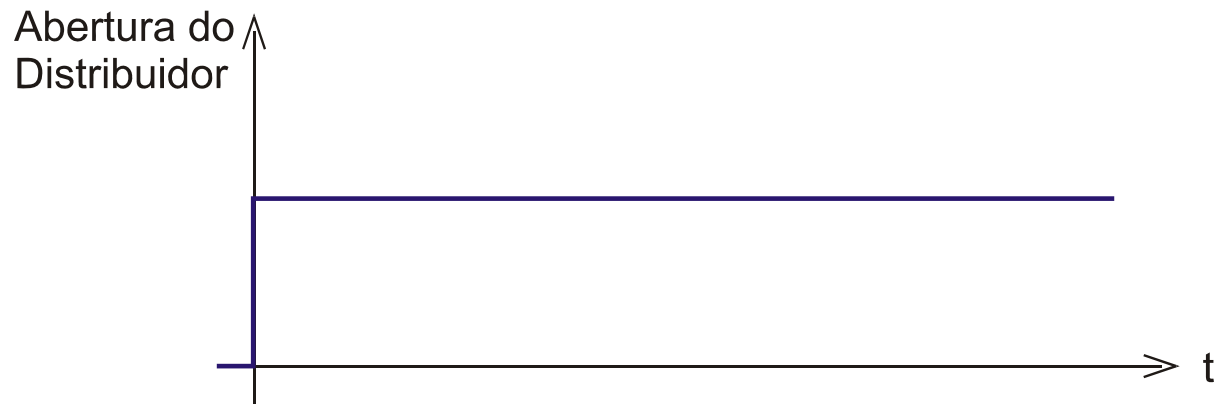


Controle de Velocidade de Turbinas Hidráulicas – Estatismo Transitório

- ↙ Comportamento típico de Turbinas Hidráulicas: redução transitória de potência após abertura do distribuidor
- ↙ Necessidade de *redução transitória do ganho* da malha de controle para garantir comportamento estável;
- ↙ Redução transitória de ganho proporcionada pela inserção de um *estatismo transitório r* no projeto do regulador;
- ↙ Ganho inversamente proporcional ao estatismo \Rightarrow

$$r > R$$

Resposta Transitória de Turbinas Hidráulicas



Implementação do Estatismo

↙ Regulador Isócrono

- ☐ Não apresenta estatismo;
- ☐ Ilustração via implementação hidráulico-mecânica.

↙ Regulador com queda de velocidade (turbogeradores):

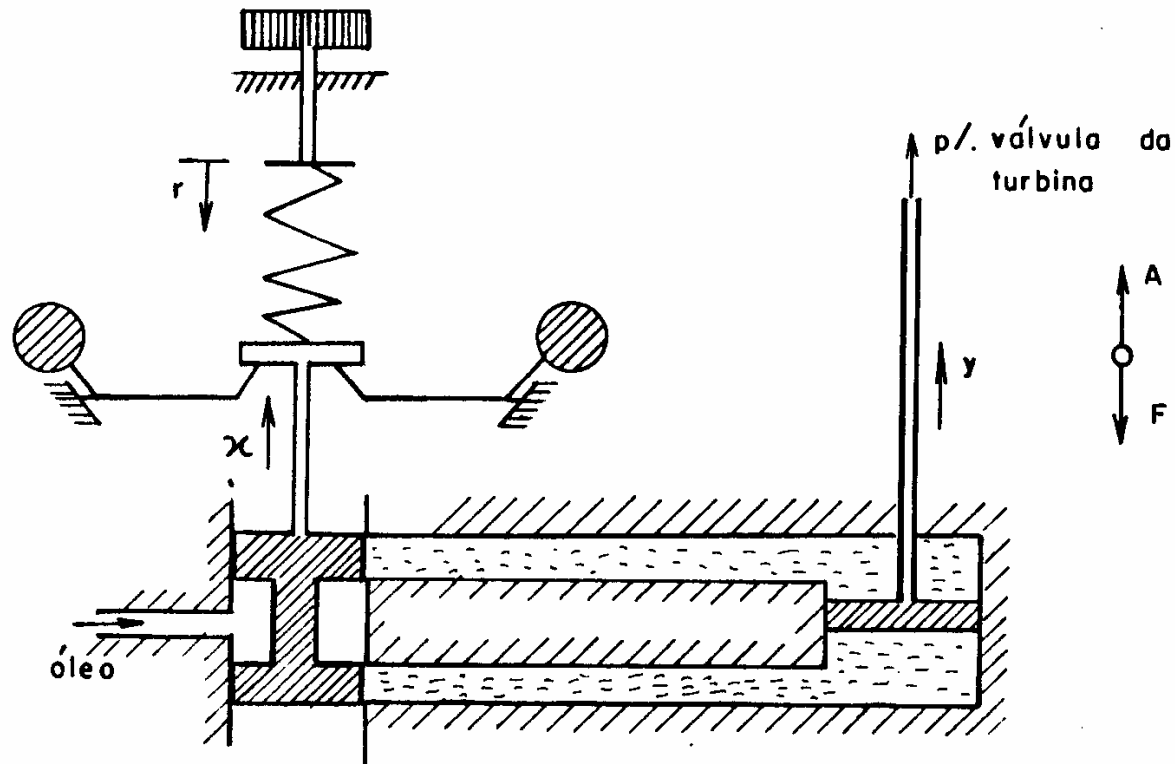
- ☐ Realimentação rígida entre servopistão e sensor de velocidade;
- ☐ Não apresenta estatismo transitório;
- ☐ Ilustração via implementação hidráulico-mecânica.

↙ Regulador com queda de velocidade transitória (turbinas hidráulicas):

- ☐ Realimentação “flexível” entre servopistão e sensor de velocidade;
- ☐ Amortecedor hidráulico na realimentação ⇒ *estatismo transitório*;
- ☐ Ilustração via implementação hidráulico-mecânica.

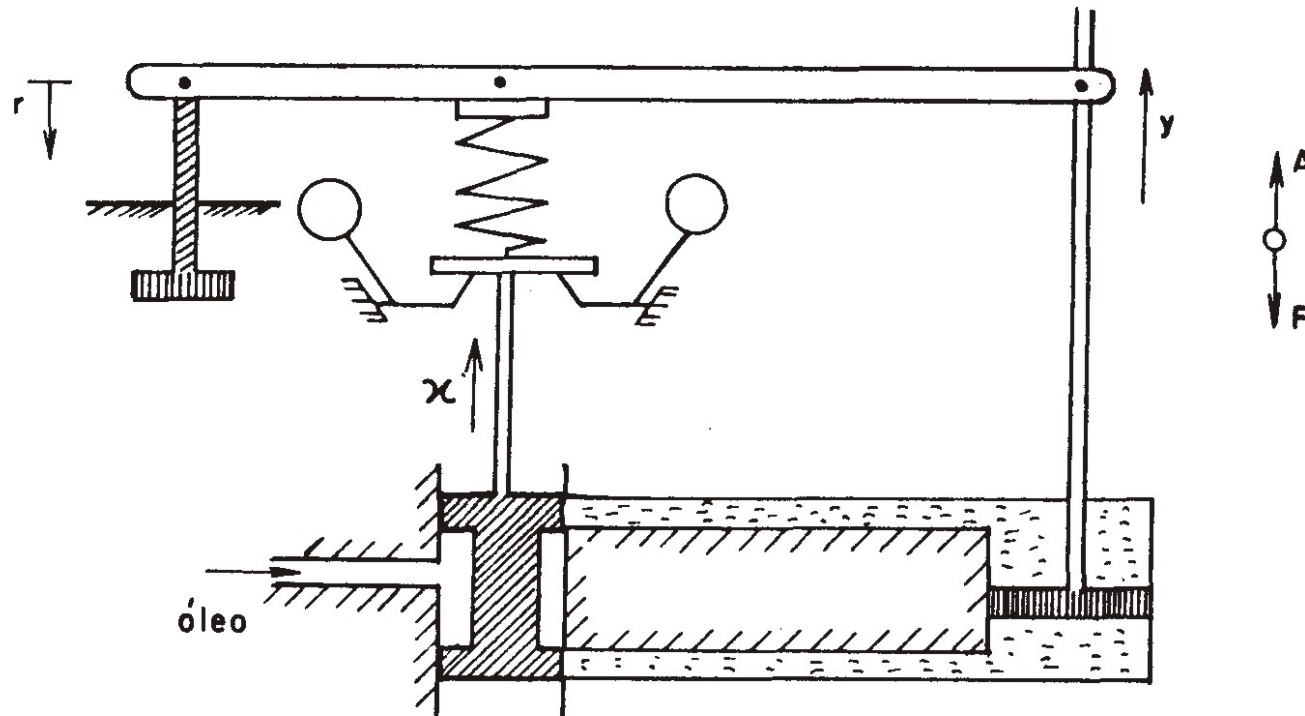
Regulador de Velocidade para Turbinas a Vapor

Regulador Isócrono

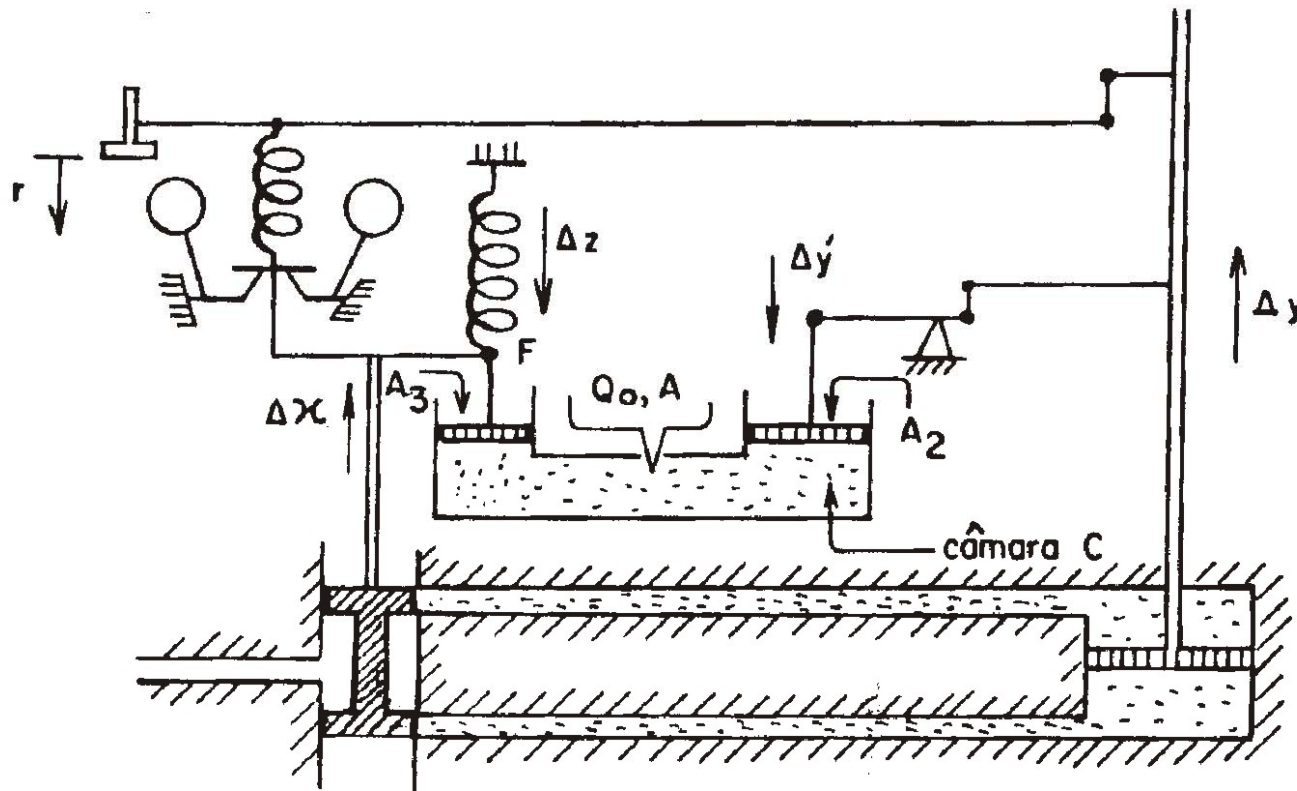


Regulador de Velocidade para Turbinas a Vapor

Regulador com Queda de Velocidade



Regulador de Velocidade para Turbinas Hidráulicas



Regulação Primária de Sistema Isolado: Exemplo Ilustrativo

↙ Sem Regulador

☰ Desvio a um degrau de carga: $\Delta f(\infty) = -\frac{\Delta L}{D}$

☰ Comentário: Desvio de frequência é limitado apenas pela redução de carga com a queda de frequência

↙ Com Regulador

☰ Desvio a um degrau de carga: $\Delta f(\infty) = -\frac{\Delta L}{D + \frac{1}{R}}$

☰ Comentários: Desvio de frequência limitado não só por D, mas também pelo inverso do estatismo permanente

Regulação Primária de Sistema Isolado: Exemplo sem Regulador

- » Seja: Pot. Nominal => $P_n = 2000$ MW
- » Carga Nominal => $P_L = 1000$ MW
- » Constante de Inércia => $M = 1/6$ s
- » Variação Carga/freqüência => $D = 1\%$

$$D = \frac{0.01 \times \frac{P_L}{P_n}}{0.01 \times f_0} = \frac{1000}{60 \cancel{2000}} = \frac{1}{120} \text{ puMW} / \text{Hz}$$

- » Para um incremento de carga => $\Delta L = 20 \text{ MW} = 0.01 \text{ pu}$

Regulador Bloqueado:

$$\Delta f(\infty) = -\frac{\Delta L}{D} = -\frac{0.01}{\cancel{1}/120} = -1.2 \text{ Hz}$$

$$f(\infty) = f_0 + \Delta f(\infty) = 60 - 1.2 = 58.8 \text{ Hz}$$

Regulação Primária de Sistema Isolado: Exemplo com Regulador

- » Seja: Pot. Nominal => $P_n = 2000 \text{ MW}$
- » Carga Nominal => $P_L = 1000 \text{ MW}$
- » Constante de Inércia => $M = 1/6 \text{ s}$
- » Variação Carga/freqüência => $D = 1/120 \text{ puMW / Hz}$
- » Estatismo => $R = 4 \%$

$$R = \frac{0.04 \text{ puHz}}{\text{puMW}} = \frac{0.04 \times 60 \text{ Hz}}{\text{puMW}} = 2.4 \frac{\text{Hz}}{\text{puMW}}$$

- » Para um incremento de carga => $\Delta L = 20 \text{ MW} = 0.01 \text{ pu}$

Regulação Primária:

$$\Delta f(\infty) = - \frac{\Delta L}{D + \frac{1}{R}} = - \frac{0.01}{\frac{1}{120} + \frac{1}{2.4}} = -0.0235 \text{ Hz}$$

$$f(\infty) = f_0 + \Delta f(\infty) = 60 - 0.0235 = 59.9765 \text{ Hz}$$

Regulação Primária de Sistema Isolado: Comentários sobre Exemplo com Regulador

☰ O suprimento do degrau de carga é composto de 3 componentes:

- » Energia tomada emprestada da energia cinética das massas girantes do sistema (Queda de velocidade);
- » O aumento da geração, provocado pela ação do regulador;
- » A redução da carga, por efeito da queda de frequência.

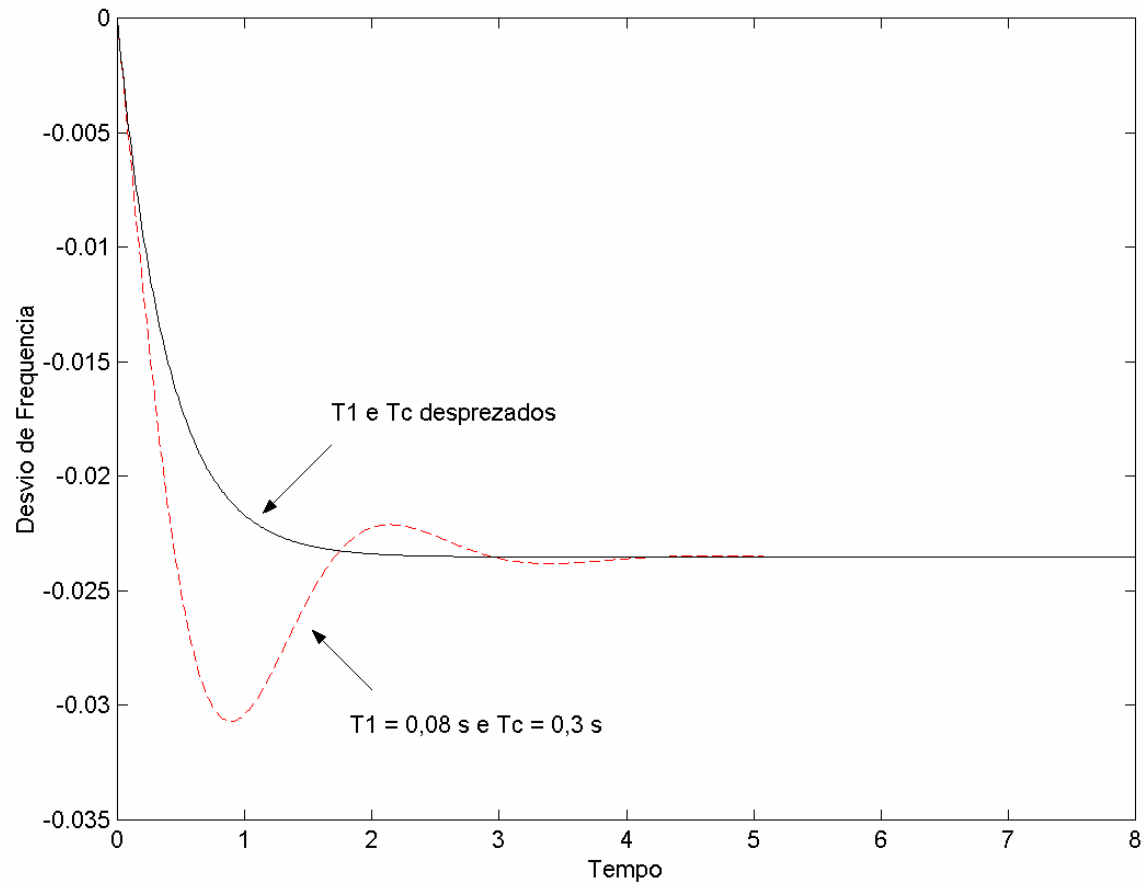
☰ Assim:

$$\Delta P_m (\infty) = - \frac{1}{R} \times \Delta f (\infty) = \frac{0.0235 \times 2000}{2.4} \text{ Mw} = 19.6 \text{ Mw}$$

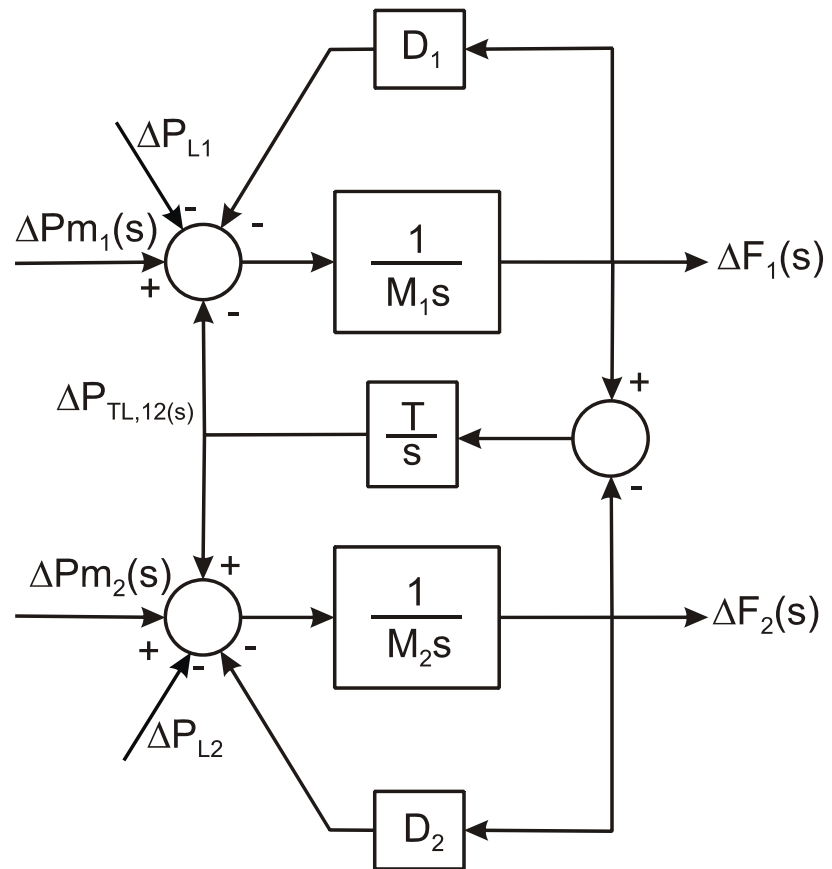
$$\Delta P_L (\infty) = D \times \Delta f (\infty) = - \frac{0.0235 \times 2000}{120} \text{ Mw} = -0.4 \text{ Mw}$$

$$\Delta P_m (\infty) - \Delta P_L (\infty) = 19.6 - (-0.4) = 20 \text{ Mw} = \Delta L$$

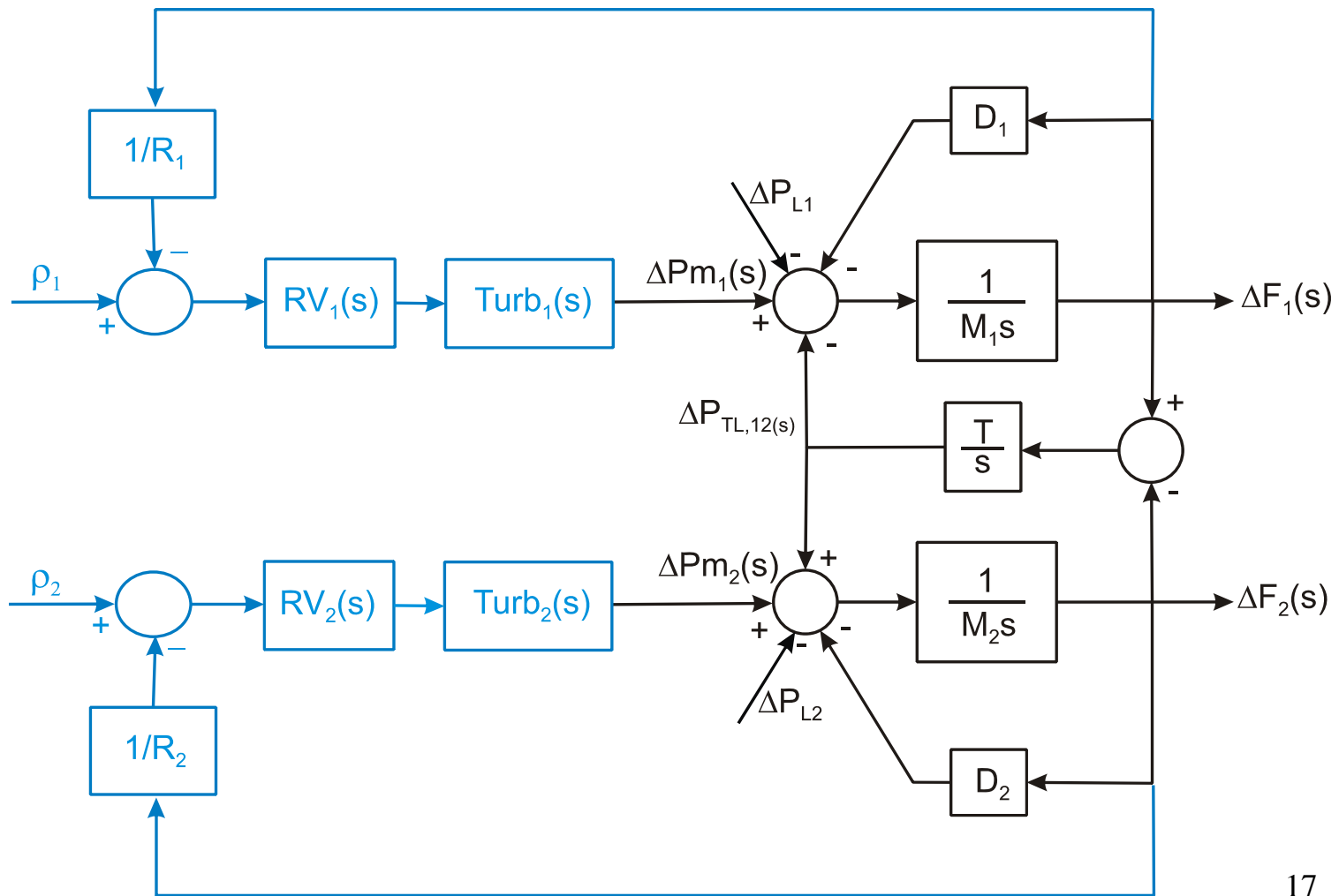
Regulação Primária de Sistema Isolado: Resposta Transitória



Duas Áreas Interligadas **sem** Regulação Primária



Duas Áreas Interligadas com Regulação Primária



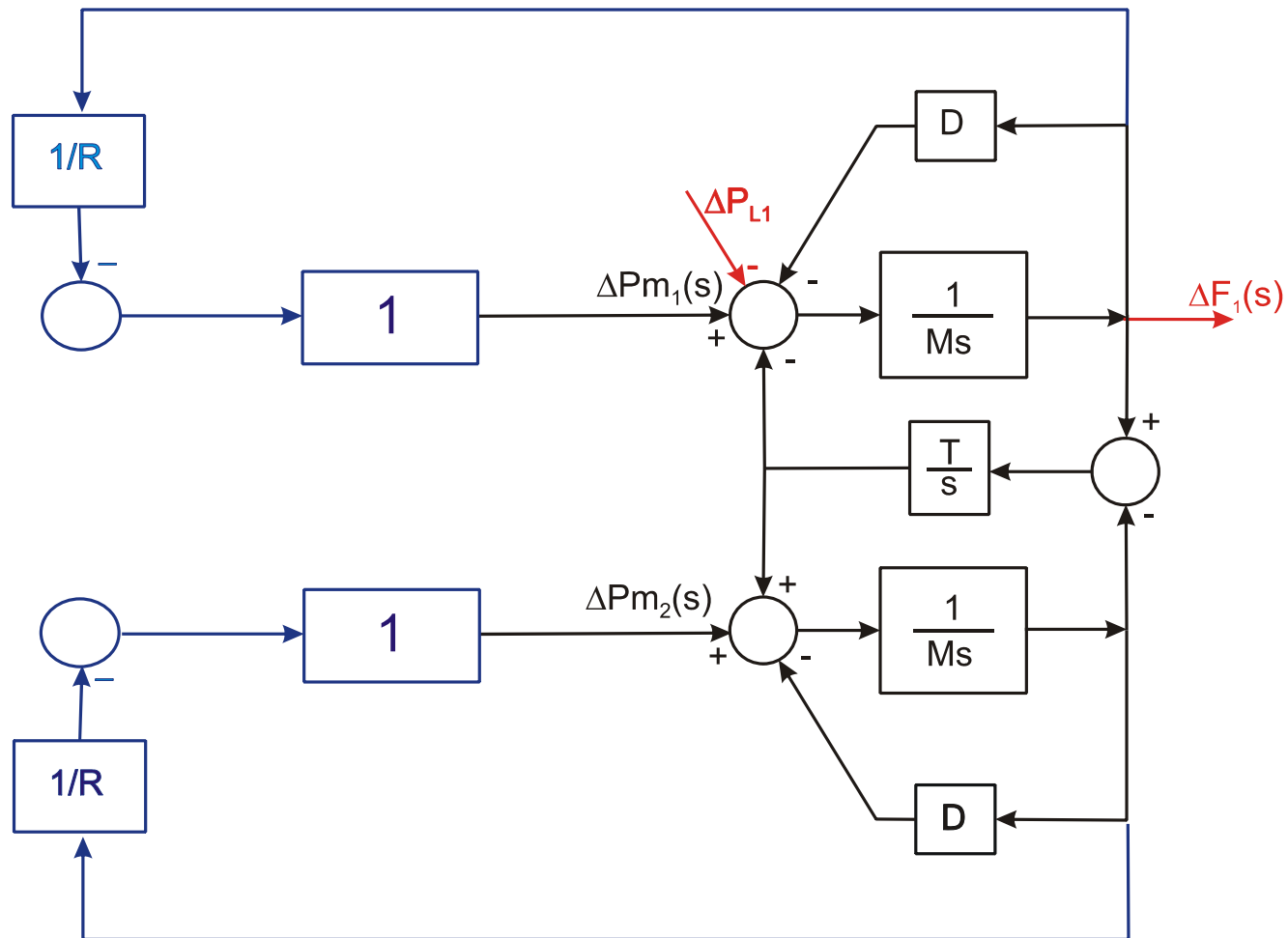
Regulação Primária de Duas Áreas Interligadas: Comportamento Transitório - I

➤ Simplificações:

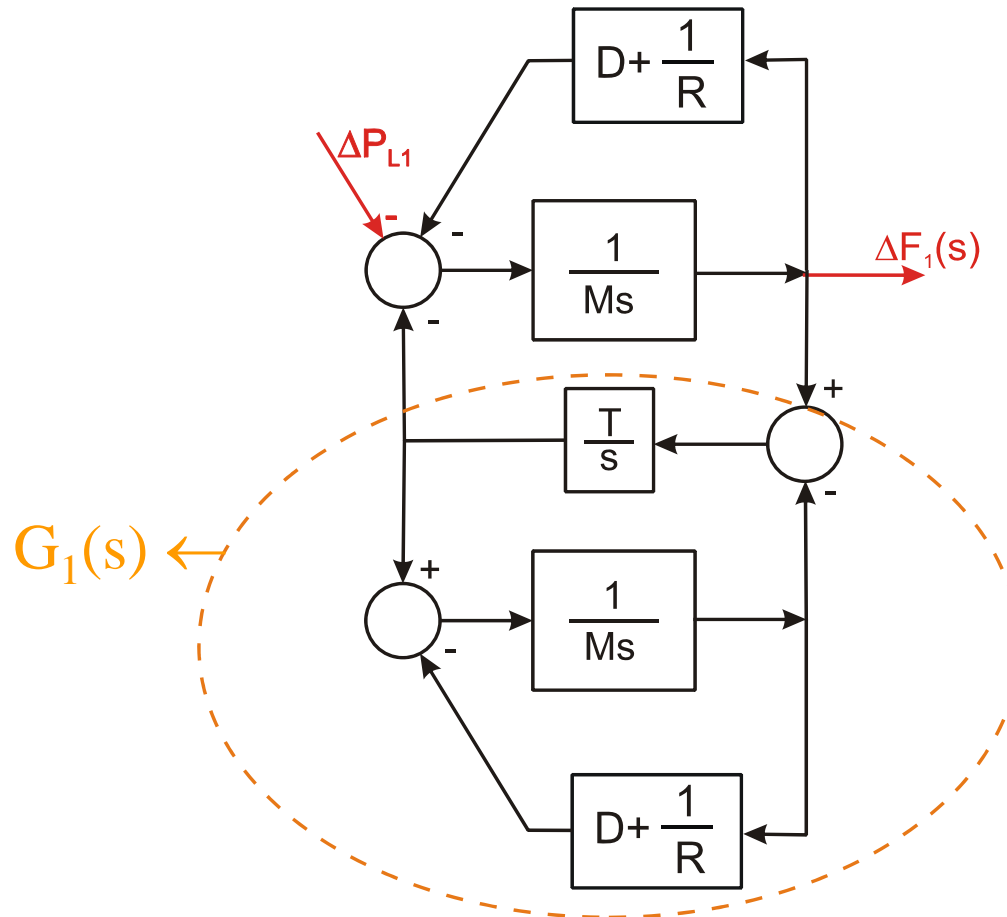
- Áreas iguais: $M_1 = M_2$, $D_1 = D_2$, $R_1 = R_2$;
- Dinâmicas de reguladores e turbinas “instantâneas” ($T_R = T_C \approx 0$).

➤ Resposta de desvio de frequência da Área 1 a degrau de carga na mesma área.

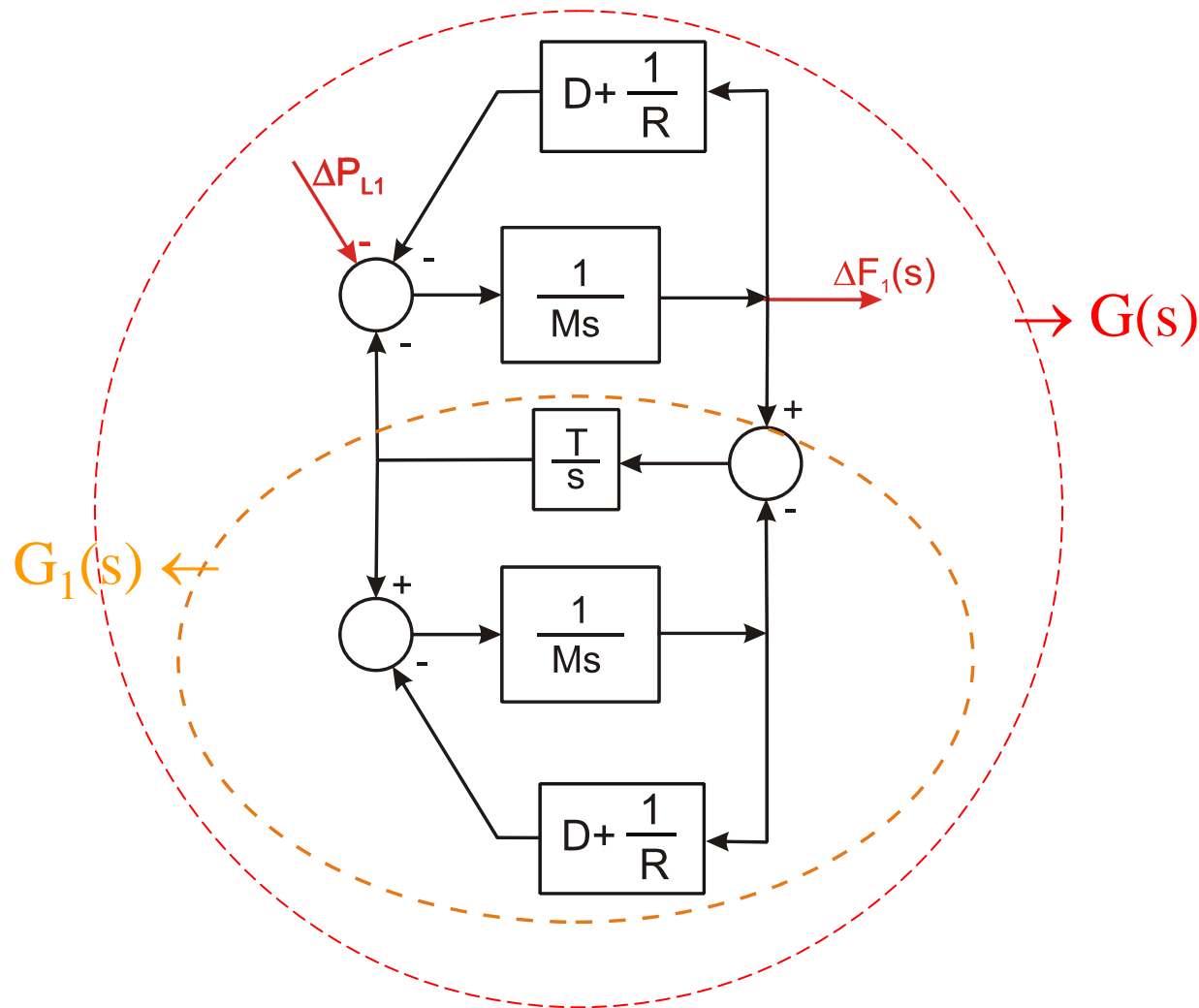
Regulação Primária de Duas Áreas Interligadas: Comportamento Transitório - II



Regulação Primária de Duas Áreas Interligadas: Comportamento Transitório - III



Regulação Primária de Duas Áreas Interligadas: Comportamento Transitório - IV



Regulação Primária de Duas Áreas Interligadas:

Comportamento Transitório - V

- Função de Transferência $G(s)$:

$$G(s) = \frac{\Delta F_1(s)}{\Delta P_{L1}(s)} = -\frac{\beta(M\beta s^2 + s + T\beta)}{(M\beta s^2 + s + 2T\beta)(1 + M\beta s)}, \quad \beta = D + \frac{1}{R}$$

- Respostas a um degrau de carga na área 1, de amplitude ΔL :

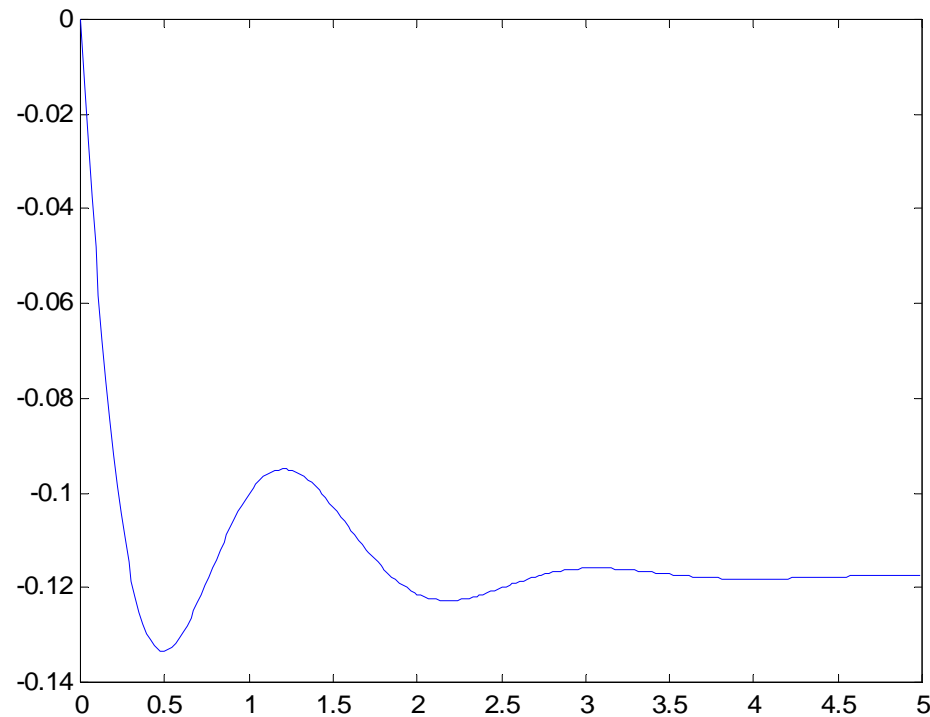
$$\Delta f_1(t) = \Delta L \left(-\frac{1}{2\beta} + \frac{1}{2\beta} e^{-\frac{\beta t}{M}} - \frac{e^{-\frac{\beta t}{2M}}}{\sqrt{8TM - \beta^2}} \operatorname{sen} \left(\sqrt{\frac{2T}{M} - \frac{\beta^2}{4M^2}} t + \phi \right) \right)$$

$$\Delta P_{TL}(t) = -\frac{\Delta L}{2} \left[1 - \frac{e^{-\frac{\beta t}{2M}}}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \cos \left(\sqrt{\frac{2T}{M} - \frac{\beta^2}{4M^2}} t + \phi \right) \right]$$

Regulação Primária – Duas Áreas Interligadas

Resposta Transitória de Desvio de Freqüência

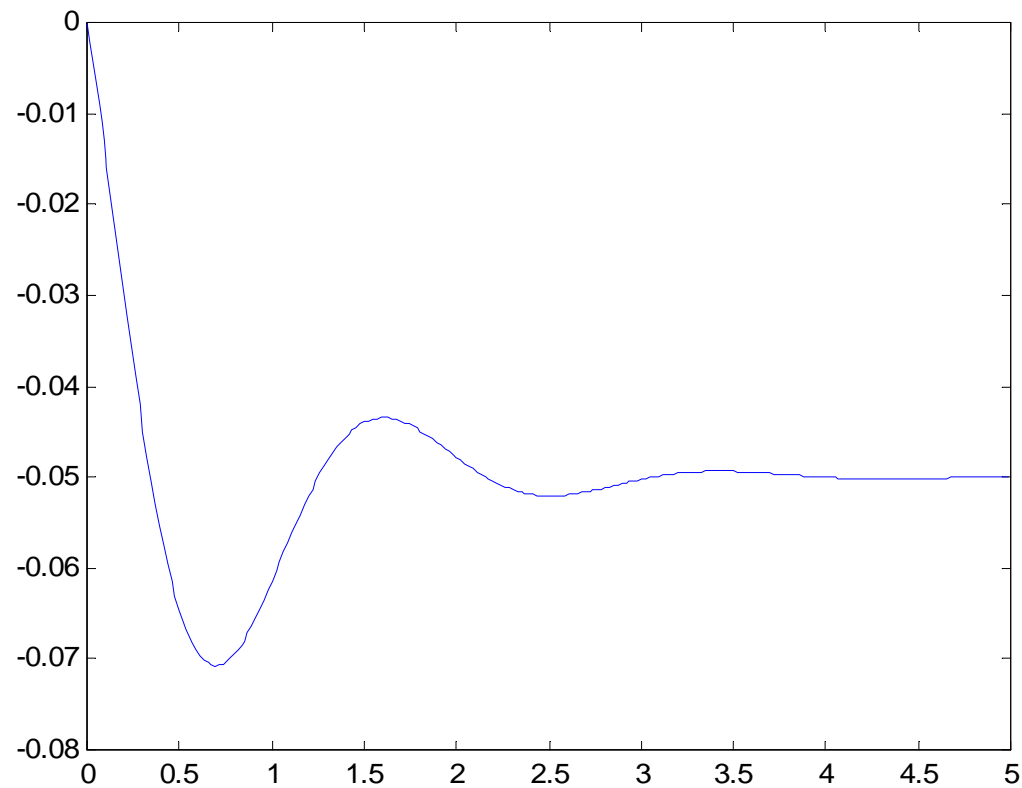
$$\Delta f_1(t) = \Delta L \left(-\frac{1}{2\beta} + \frac{1}{2\beta} e^{-\frac{\beta t}{M}} - \frac{e^{-\frac{\beta t}{2M}}}{\sqrt{8TM - \beta^2}} \operatorname{sen} \left(\sqrt{\frac{2T}{M} - \frac{\beta^2}{4M^2}} t + \phi \right) \right)$$



Regulação Primária – Duas Áreas Interligadas

Resposta Transitória de Desvio de Intercâmbio

$$\Delta P_{TL}(t) = -\frac{\Delta L}{2} \left[1 - \frac{e^{-\frac{\beta t}{2M}}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \cos\left(\sqrt{\frac{2T}{M} - \frac{\beta}{4M^2}} t + \varphi \right) \right]$$



Regulação Primária – Duas Áreas Interligadas – Desvios de Freqüência e P_{TL} em Reg. Perm.

↙ Desvio de Freqüência face a degraus de carga ΔL_1 e ΔL_2 :

$$\Delta F(\infty) = -\frac{\Delta L_1 + \Delta L_2}{\left(D_1 + \frac{1}{R_1}\right) + \left(D_2 + \frac{1}{R_2}\right)} = -\frac{\Delta L_1 + \Delta L_2}{\beta_1 + \beta_2}$$

↙ Desvio de Potência de Intercâmbio:

$$\Delta P_{TL,12} = \frac{\left(D_1 + \frac{1}{R_1}\right)\Delta L_2 - \left(D_2 + \frac{1}{R_2}\right)\Delta L_1}{\left(D_1 + \frac{1}{R_1}\right) + \left(D_2 + \frac{1}{R_2}\right)} = \frac{\beta_1\Delta L_2 - \beta_2\Delta L_1}{\beta_1 + \beta_2}$$

Regulação Primária - Sistema Multimáquinas

- Num sistema multimáquinas, dada uma variação de carga, esta é absorvida por todas as unidades geradoras de acordo com a característica de regulação dos respectivos reguladores de velocidade das turbinas, que é descendente.
- A freqüência se estabiliza em um novo valor: $F_1 \neq F_0$

