Controle de Frequência de Geração Convencional em Sistemas Isolados

ENGENHARIA
E·L·É·T·R·I·C·A

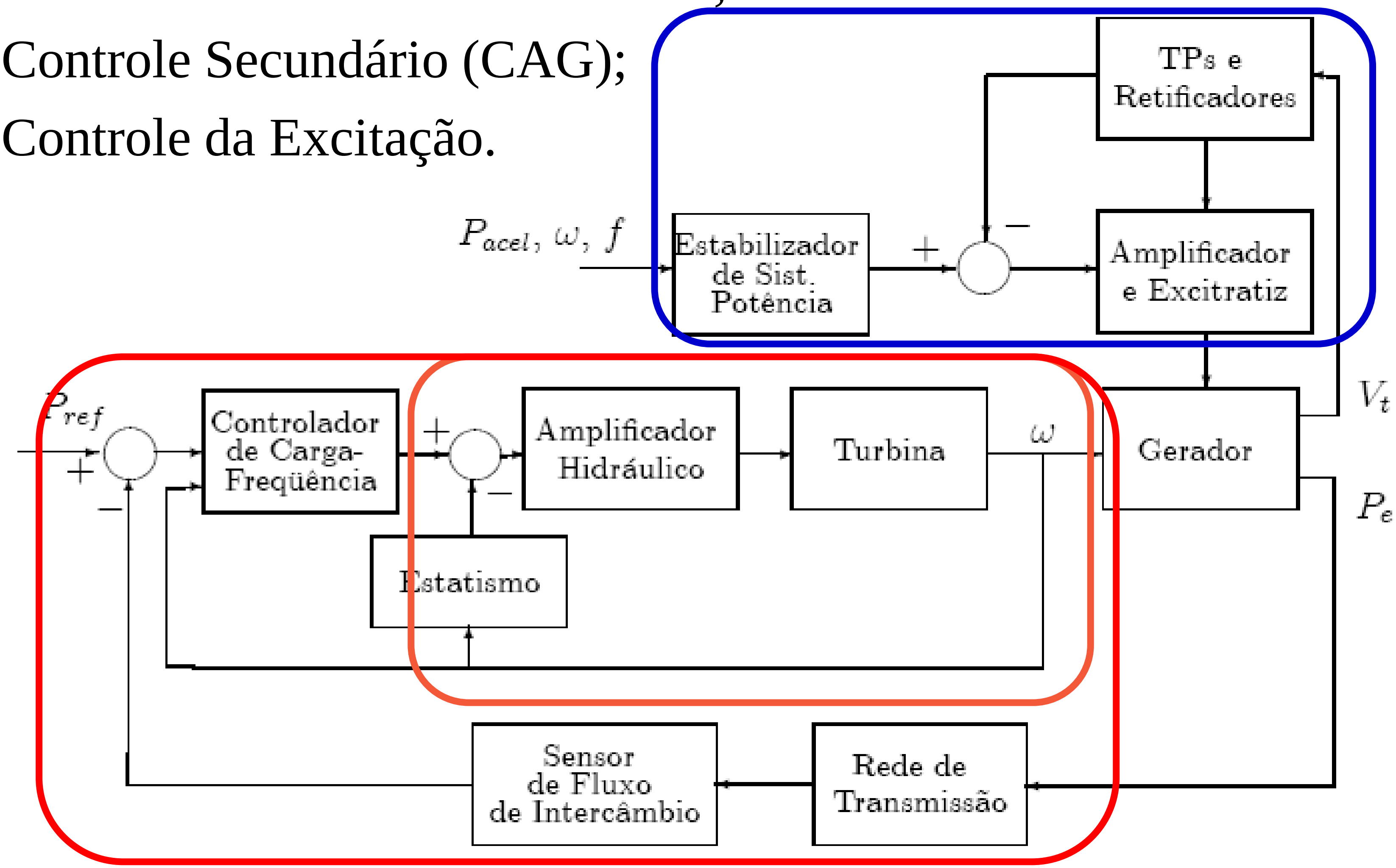
GSP

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.
- Principais ações de controle:
  - Regulação Primária ou Controle de Velocidade;
    - Reserva Instantânea (Girante) $\rightarrow$ Disponível dentro de 10 a 20 segundos.
  - Regulação Secundária ou Controle Suplementar (CAG);
    - Reserva Rápida $\rightarrow$ Disponível dentro de 1 a 10 minutos.

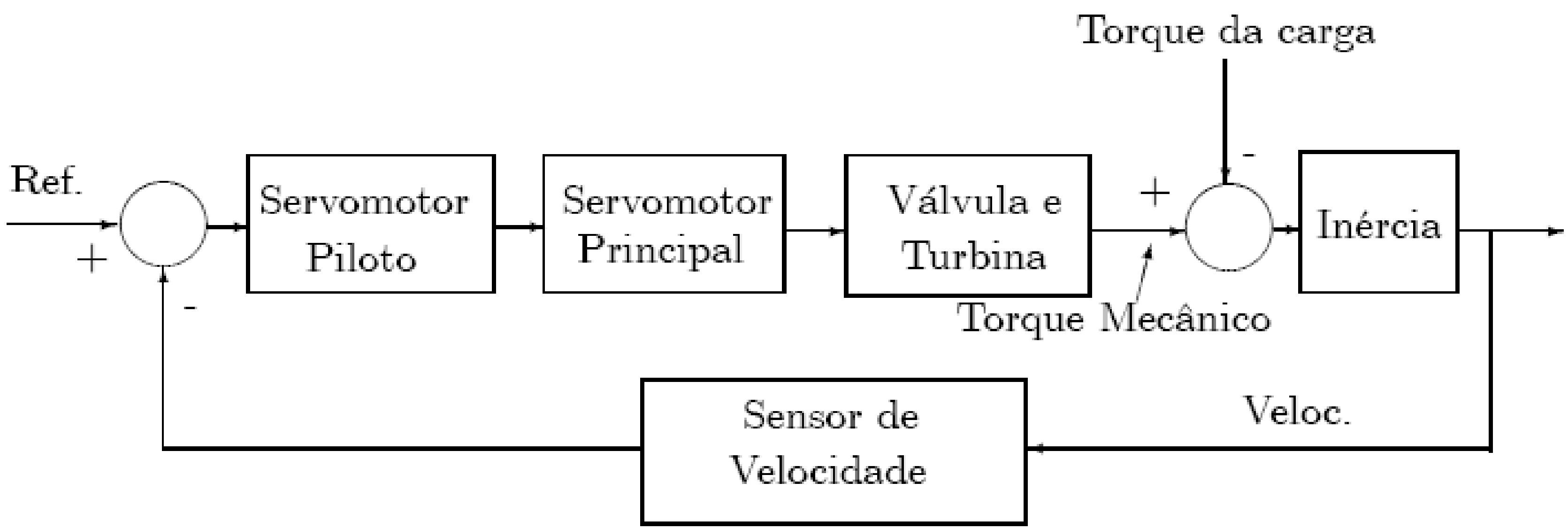
Principais Malhas de Controle Associadas a Geradores Síncronos

- Controle Primário de Velocidade;
- Controle Secundário (CAG);
- Controle da Excitação.



I – Controle Primário de Frequência

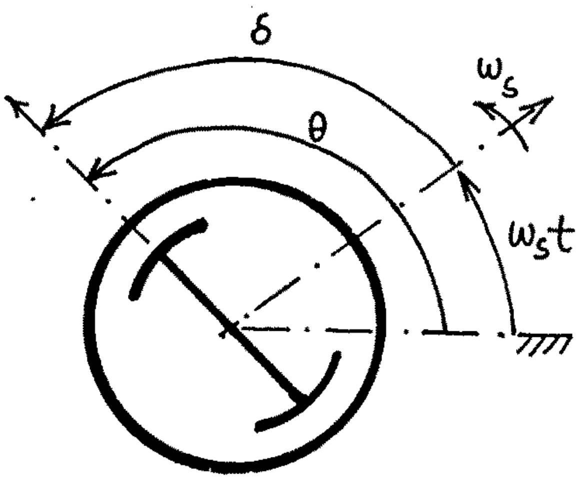
Malha de Controle Primário:



Equação de balanço de torques em um gerador síncrono (I)

- 2ª. lei de Newton aplicada ao rotor do gerador síncrono:

$$J\frac{d^2\theta}{dt^2} = T_m - T_e$$



- Define-se:

$$\delta \stackrel{\Delta}{=} \theta - w_s t$$

$$\omega \stackrel{\Delta}{=} \dot{\delta} = \dot{\theta} - w_s$$

- Portanto, ω é o desvio da velocidade em relação à velocidade síncrona.

Equação de balanço de torques em um gerador síncrono (II)

$$J\frac{d^2\theta}{dt^2} = T_m - T_e$$

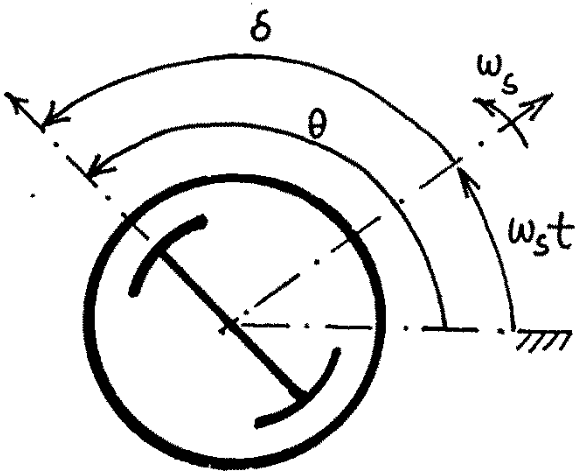
- Como $\ddot{\theta} = \dot{\omega}$:

$$J\dot{\omega} = T_m - T_e$$

ou, multiplicando a equação por ω_s:

$$\mathcal{M}\dot{\omega} = P_m - P_e$$

onde $\mathcal{M}$ é a quantidade de movimento angular. Todas as variáveis expressas em unidades físicas no MKS, ω em rad/s.



Equação de balanço de potência em um gerador síncrono (III)

- Como $\mathcal{M}$ varia muito com a potência nominal da máquina, prefere-se utilizar a constante de inércia *H*:

$$H = \frac{energia\ cinética\ armazenada\ à\ velocidade\ nominal,\ W}{potência\ aparente\ nominal\ da\ máquina,\ S_N}$$

$$H = \frac{1}{2}\frac{\mathcal{M}\omega_s}{S_N} \implies \mathcal{M} = \frac{2S_N H}{\omega_s}$$

e portanto

$$\mathcal{M}\dot{\omega} = P_m - P_e \quad \longrightarrow \quad 2H\frac{d}{dt}\left(\frac{\omega}{\omega_s}\right) = \frac{P_m}{S_N} - \frac{P_e}{S_N}$$

Equação de balanço de potência em um gerador síncrono (IV)

$$2H\frac{d}{dt}\left(\frac{\omega}{\omega_s}\right) = \frac{P_m}{S_N} - \frac{P_e}{S_N}$$

- Definindo-se:

$$\omega_{pu} \stackrel{\Delta}{=} \frac{\omega}{\omega_s} \qquad P_{m,pu} \stackrel{\Delta}{=} \frac{P_m}{S_N} \qquad P_{e,pu} \stackrel{\Delta}{=} \frac{P_e}{S_N}$$

chega-se à forma final da equação de balanço de potência:

$$\boxed{2H\,\frac{d\omega_{pu}}{dt} = P_{m,pu} - P_{e,pu}}$$

Formas equivalentes da equação de balanço de potência:

- Com a velocidade em *pu* da velocidade nominal:

$$2H\ \frac{d\omega_{pu}}{dt} = P_{m,pu} - P_{e,pu}$$

- Com a velocidade em *rad/s:*

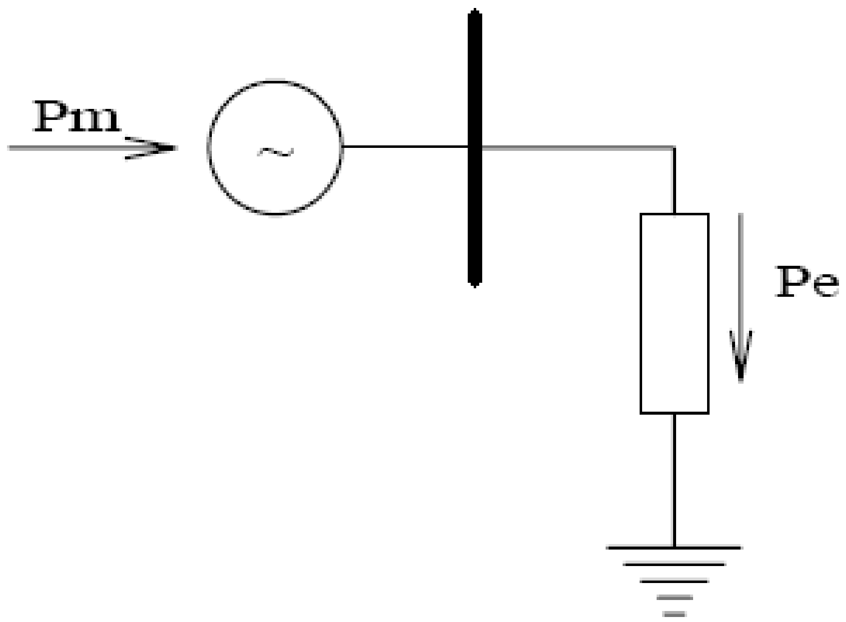
$$\frac{H}{\pi f^0}\ \frac{d\omega_{rad/s}}{dt} = P_{m,pu} - P_{e,pu}$$

- Com a frequência em Hz:

$$\frac{2H}{f^0}\frac{d(f_{Hz})}{dt} = P_{m,pu} - P_{e,pu}$$

Modelos Linearizados para Análise sem Controle Primário

- Gerador alimentando carga isolada:



Equação de Balanço de Torques

- Considerando pequenas perturbações com respeito a um dado ponto de operação:

$$2H\frac{d}{dt}(w_0 + \Delta w) = P_m^0 + \Delta P_m - (P_e^0 + \Delta P_e)$$

- Como o ponto de operação inicial é de *regime permanente*:

$$2H\frac{d}{dt}(\Delta w) = \Delta P_m - \Delta P_e$$

Variações das Potências Mecânica e Elétrica

- ΔP_m é resultado da ação do Regulador de Velocidade: ausência de RV $\Rightarrow$ $\Delta P_m = 0$;
- ΔP_e é a variação da potência solicitada pela carga;
- Supõe-se que a potência demandada pela carga é parcialmente dependente da freqüência:

$$\Delta P_e = \Delta P_L + D \times \Delta w$$

Variação da Velocidade

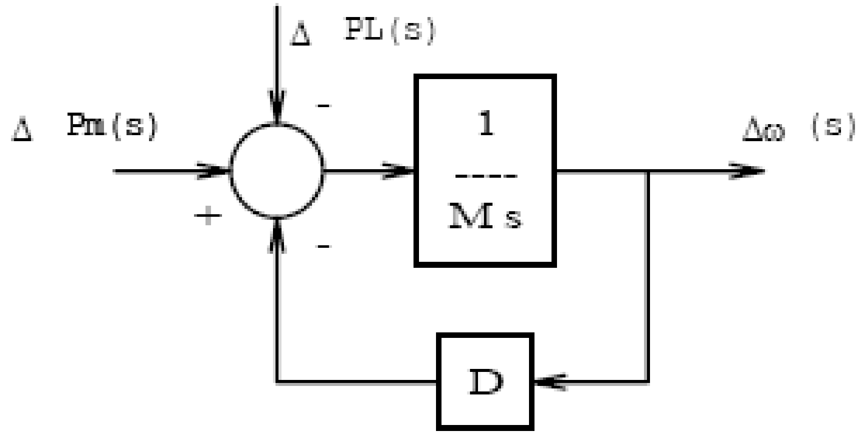
- A equação de balanço de torques torna-se:

$$2H\frac{d}{dt}(\Delta w) = \Delta P_m - \Delta P_L - D\Delta w$$

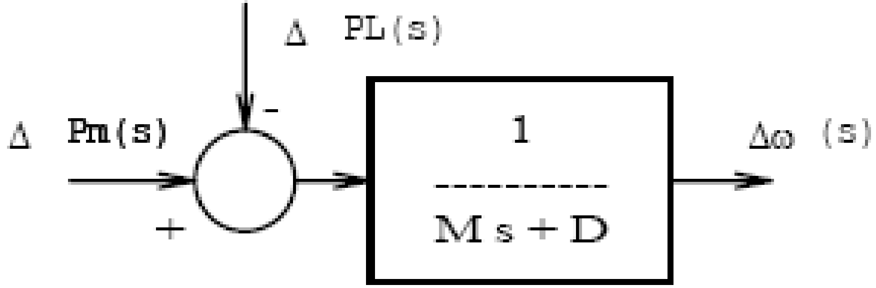
- Após a aplicação da Transf. de Laplace:

$$\Delta w(s) = \frac{1}{Ms}(\Delta P_m(s) - \Delta P_L(s) - D\Delta w(s))$$

Diagrama de Blocos



ou



Resposta a um degrau de carga (I)

- Supondo regulador bloqueado, a FT entre desvio de velocidade e degrau de carga pode ser escrita como:

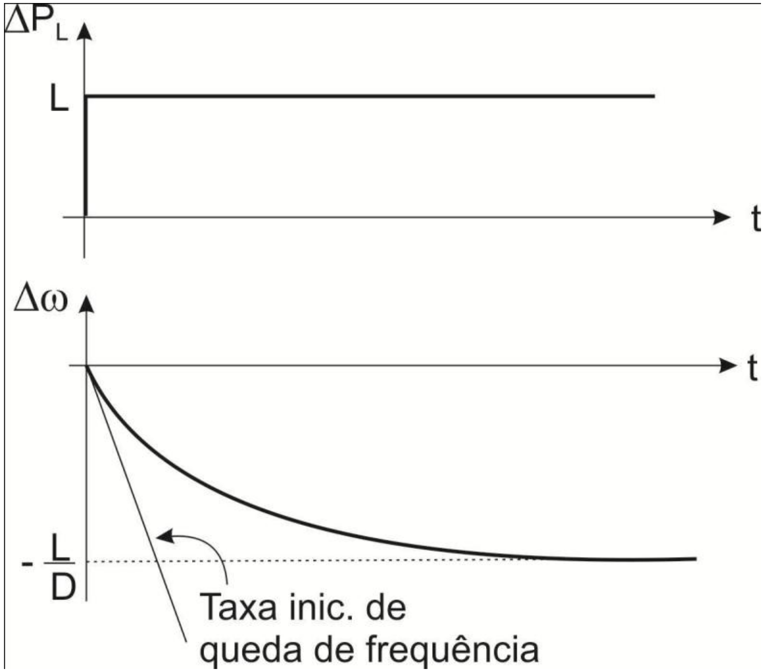
$$\frac{\Delta\omega(s)}{\Delta P_L(s)} = -\frac{1}{Ms+D} = -\frac{1/D}{1+s(M/D)}$$

- Resposta a degrau de carga de ampl. *L:*

$$\Delta\omega(t) = -\frac{L}{D}(1 - e^{-\frac{t}{(M/D)}})$$

- Note que $\Delta\dot{\omega}(0) = -DL/M$, ou seja, quanto maior a inércia menor a queda inicial de frequência.

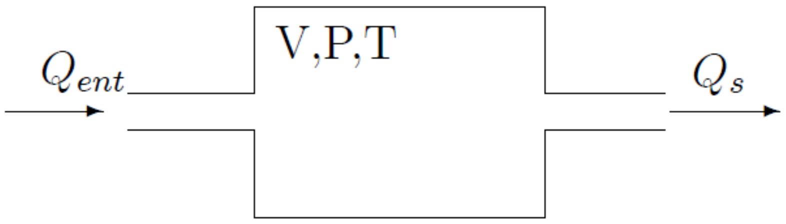
Resposta a um degrau de carga (I)



- Taxa inic. de queda de freq. influenciada pela inércia;
- Como não há entrada de energia para o sistema, estabilização da resposta só depende da sensibilidade da carga, *D*.

Turbinas de Unidades Térmicas (I)

- Câmara de vapor: componente elementar para modelagem de uma turbina térmica;

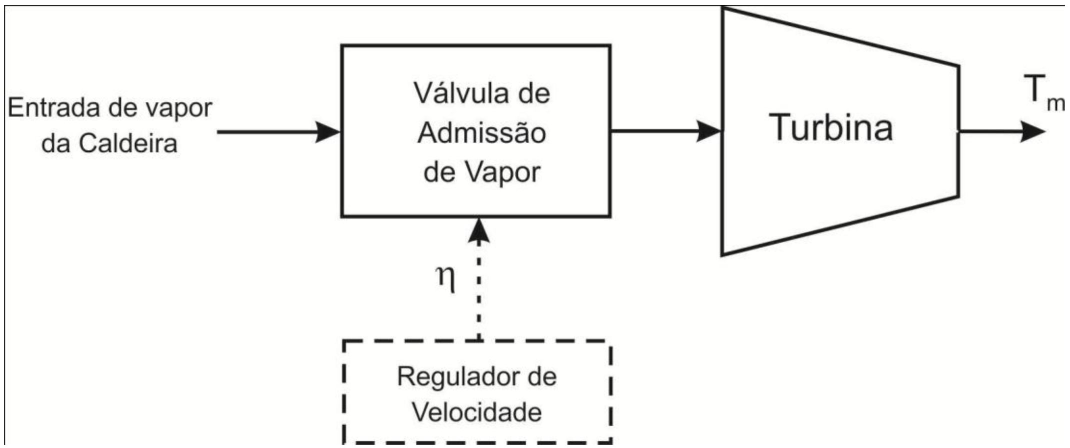


- Para peqs. variações, a câmara se comporta como um sistema de 1ª. ordem:

$$\frac{Q_s(s)}{Q_{ent}(s)} = \frac{1}{1 + s\,T}$$

onde T depende das propriedades do vapor, das conds. de pressão e temperatura, e é proporcional ao volume da câmara.

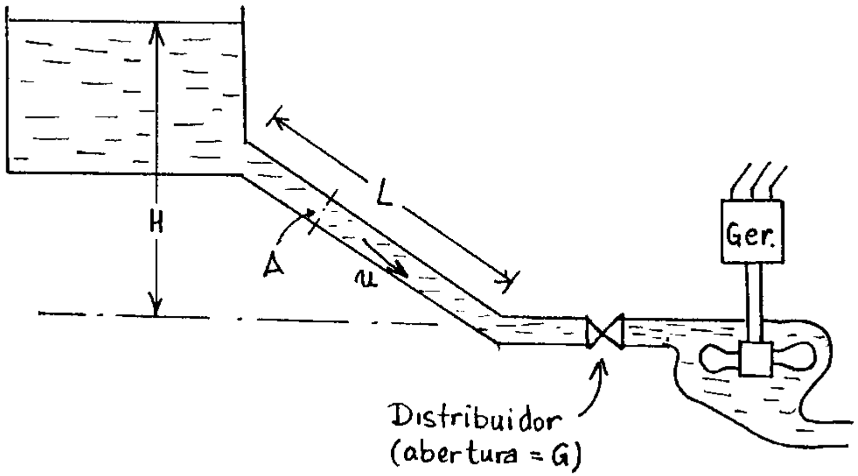
Turbinas de Unidades Térmicas (II)



- A válvula de admissão pode ser modelada como um ganho constante, K_c entre o comando η e o fluxo de vapor de entr.;
- Há um atraso de tempo T_c entre o fluxo de vapor de entrada e a produção de torque na saída:

$$\boxed{\frac{T_m(s)}{\eta(s)} = \frac{K_v}{1 + s\,T_c}}$$

Turbinas de unidades hidrelétricas

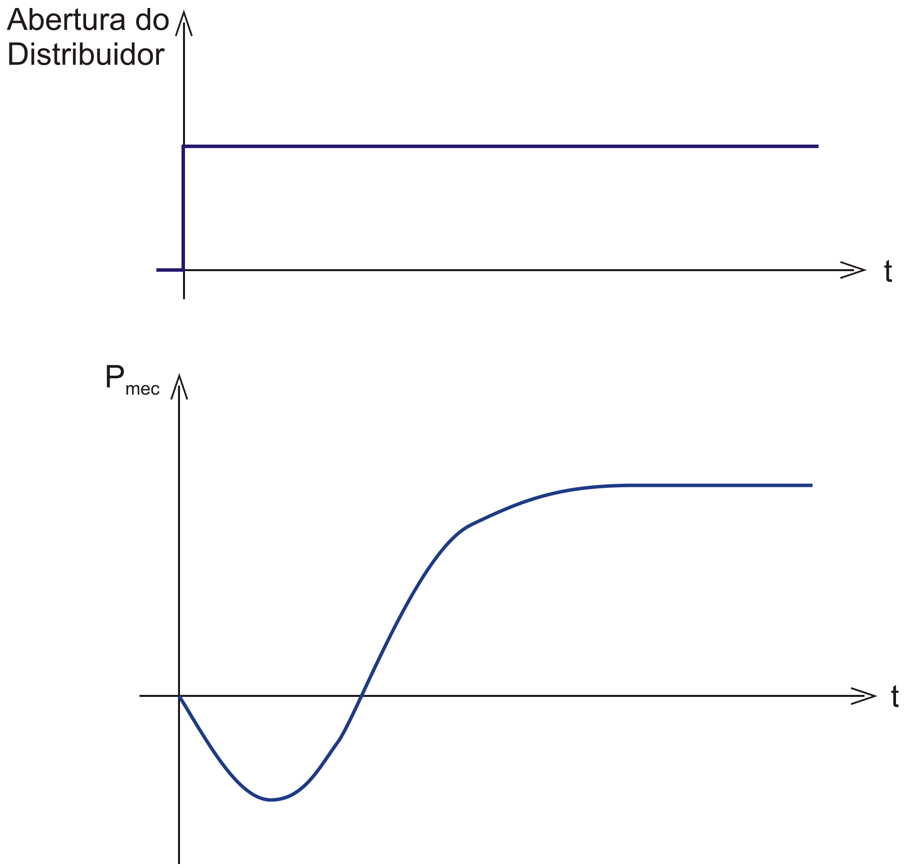


- A resposta transitória peculiar da variação da vazão no conduto forçado é representada por um zero na FT da turbina, localizado no semiplano direito:

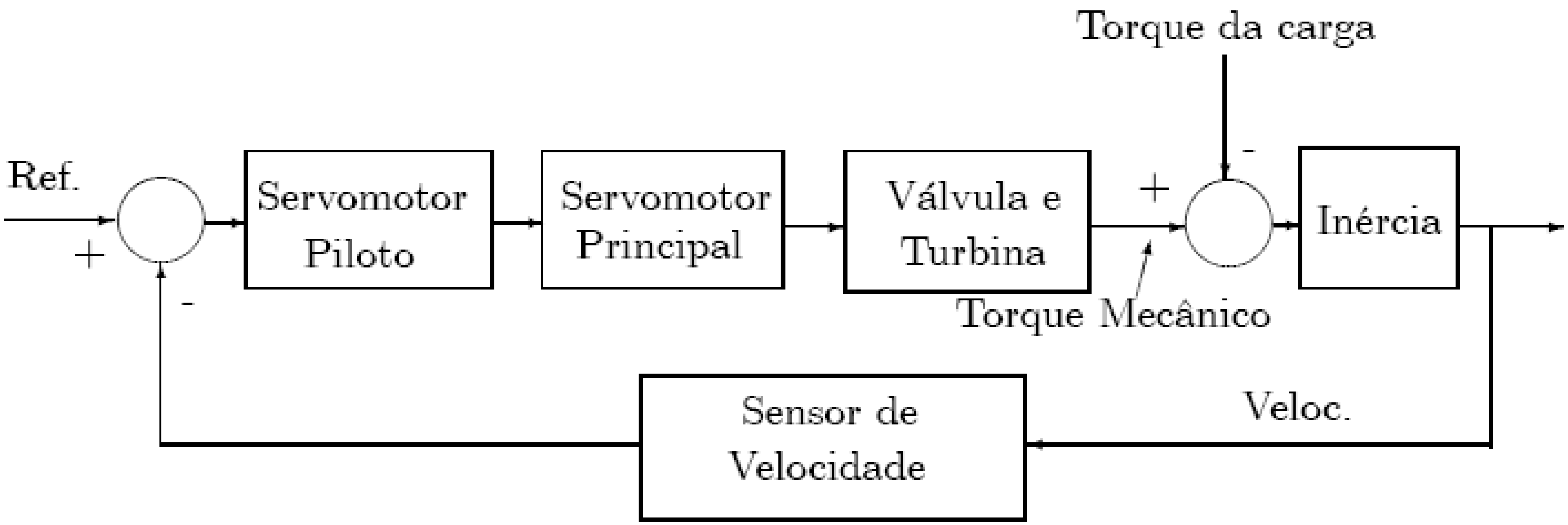
$$\boxed{\frac{\Delta P_{m,pu}(s)}{\Delta G_{pu}(s)} = \frac{1 - T_W s}{1 + (T_W/2)s}}$$

Resposta Transitória de Turbinas Hidráulicas

- Constante de tempo T_W depende da condição de operação.



Controle de Frequência - Regulação Primária



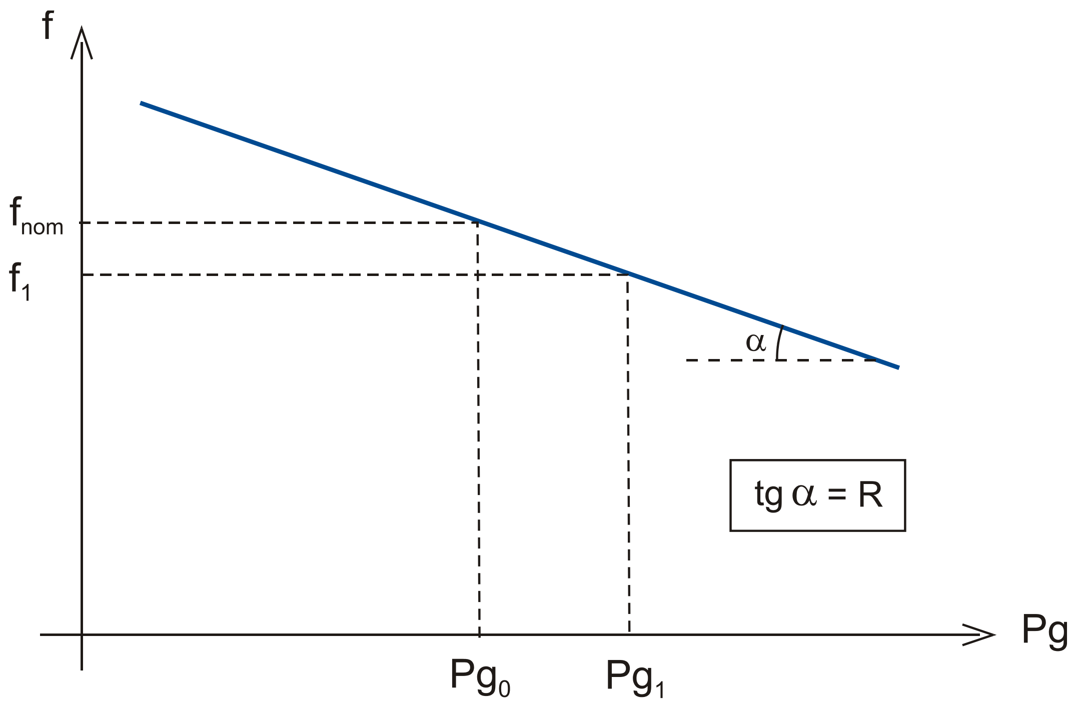
Controle de Freqüência - Regulação Primária

- 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 Frequência:

Estatismo Permanente

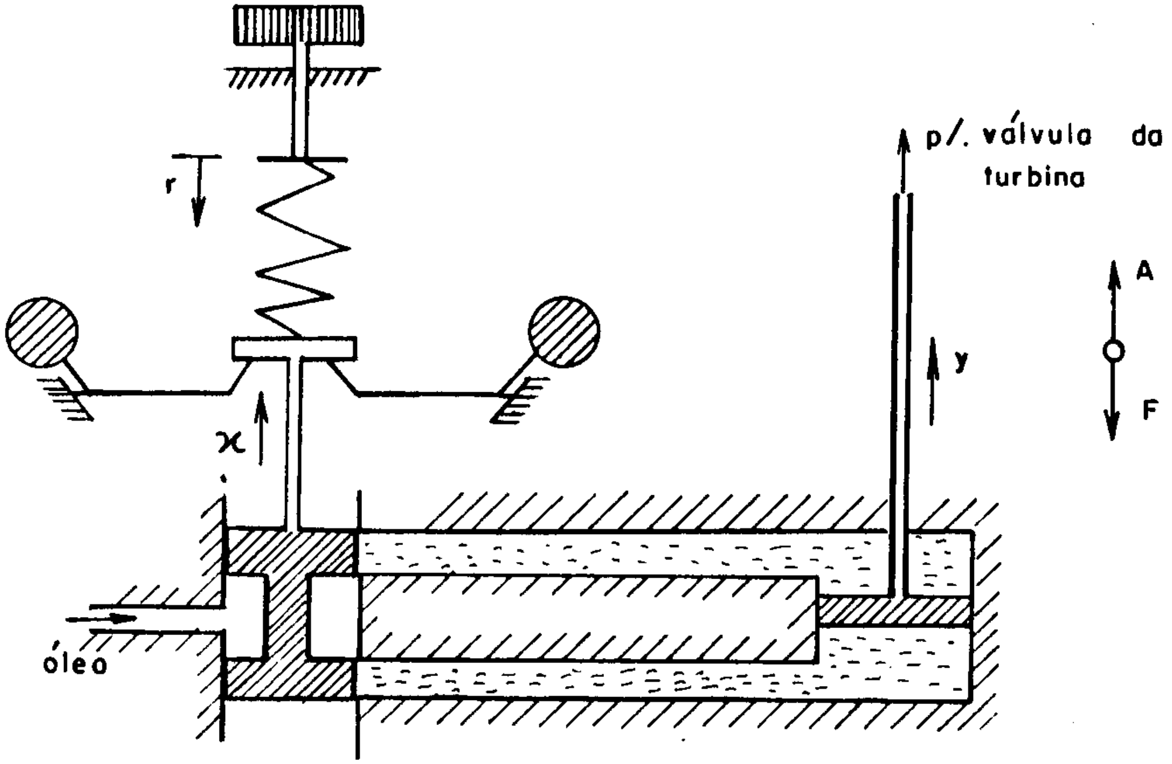
- Determina as *características estáticas* da malha de controle:



Implementação do Estatismo

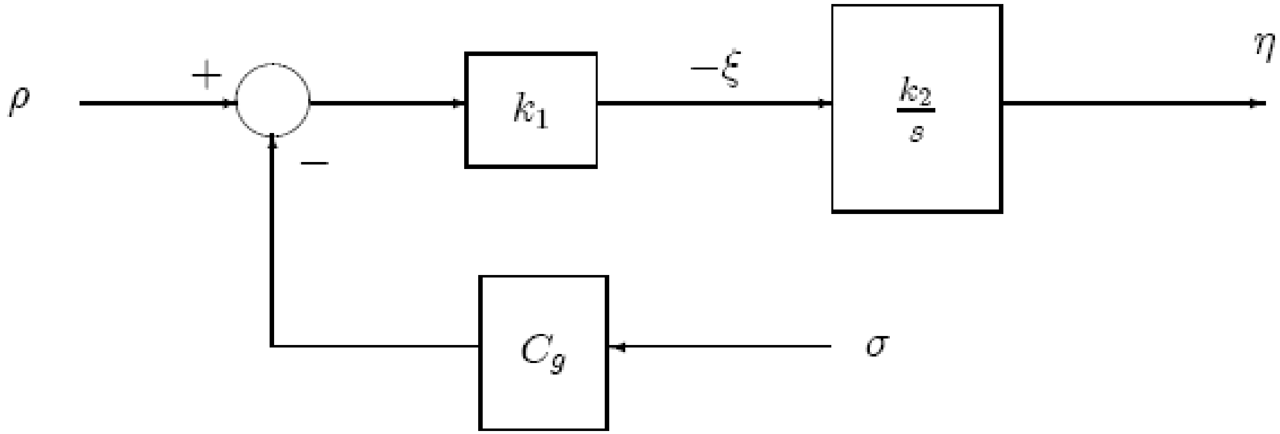
- Regulador Isócrono
  - Não apresenta estatismo;
  - Ilustração via implementação hidráulico-mecânica.
- Regulador com queda de velocidade (turbogeradores):
  - Realimentação rígida entre servopistão e sensor de velocidade;
  - Não apresenta estatismo transitório;
  - Ilustração via implementação hidráulico-mecânica.
- Regulador com queda de velocidade transitória (turbinas hidráulicas):
  - Realimentação "flexível" entre servopistão e sensor de velocidade;
  - Amortecedor hidráulico na realimentação $\Rightarrow$ *estatismo transitório*;
  - Ilustração via implementação hidráulico-mecânica.

Regulador de Veloc. para Turbinas Térmicas:
Regulador Isócrono

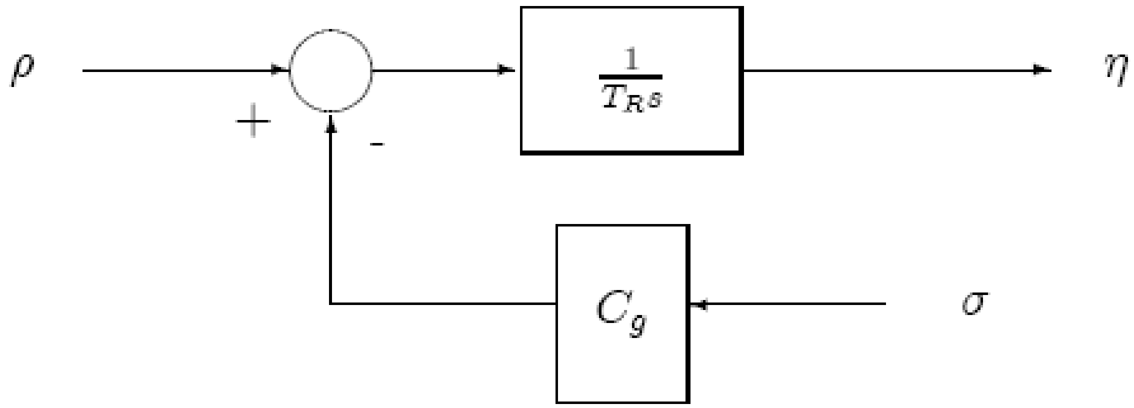


Regulador Isócrono: Diagrama de Blocos

- Diagrama de blocos inicial:

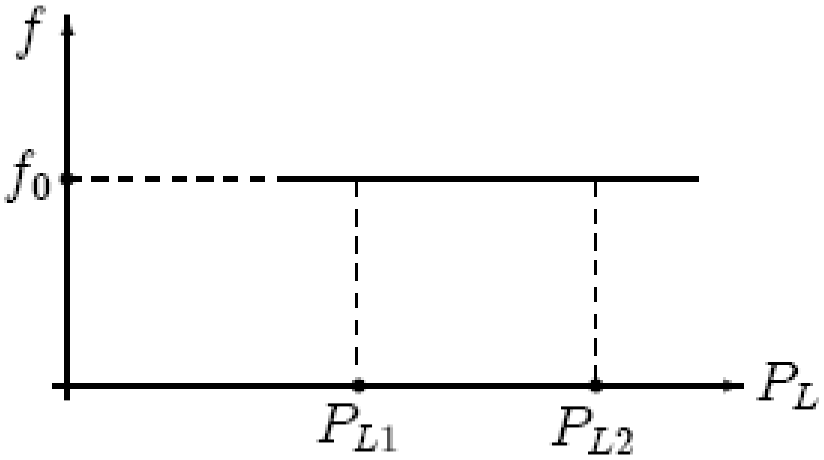


- Diagrama de blocos reduzido:

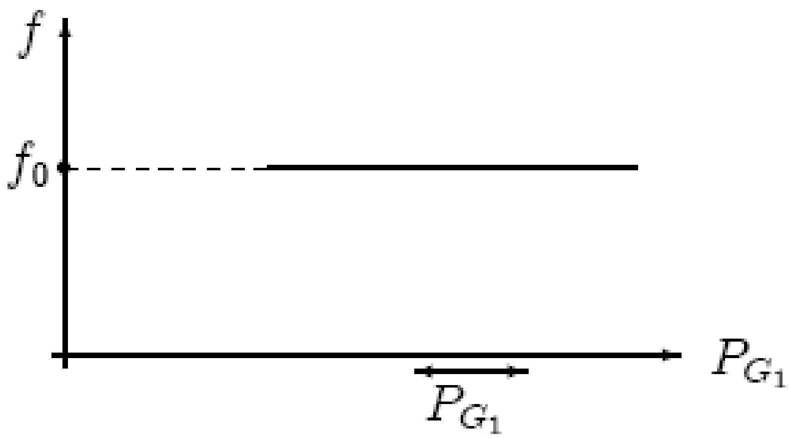


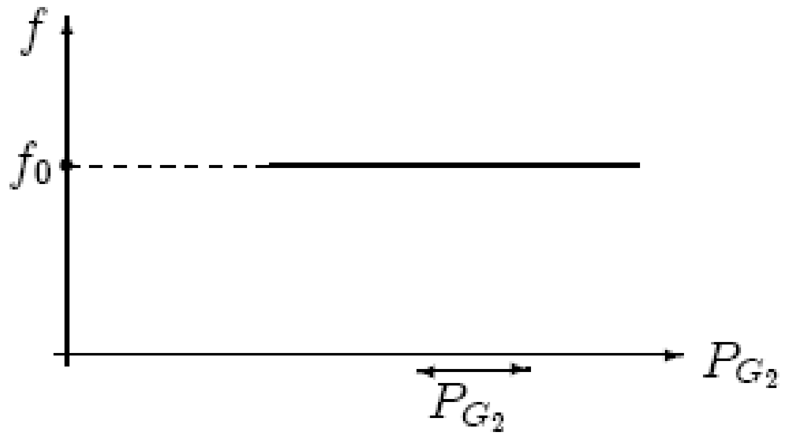
Regulador Isócrono:
Característica Estática

- Gerador isolado:



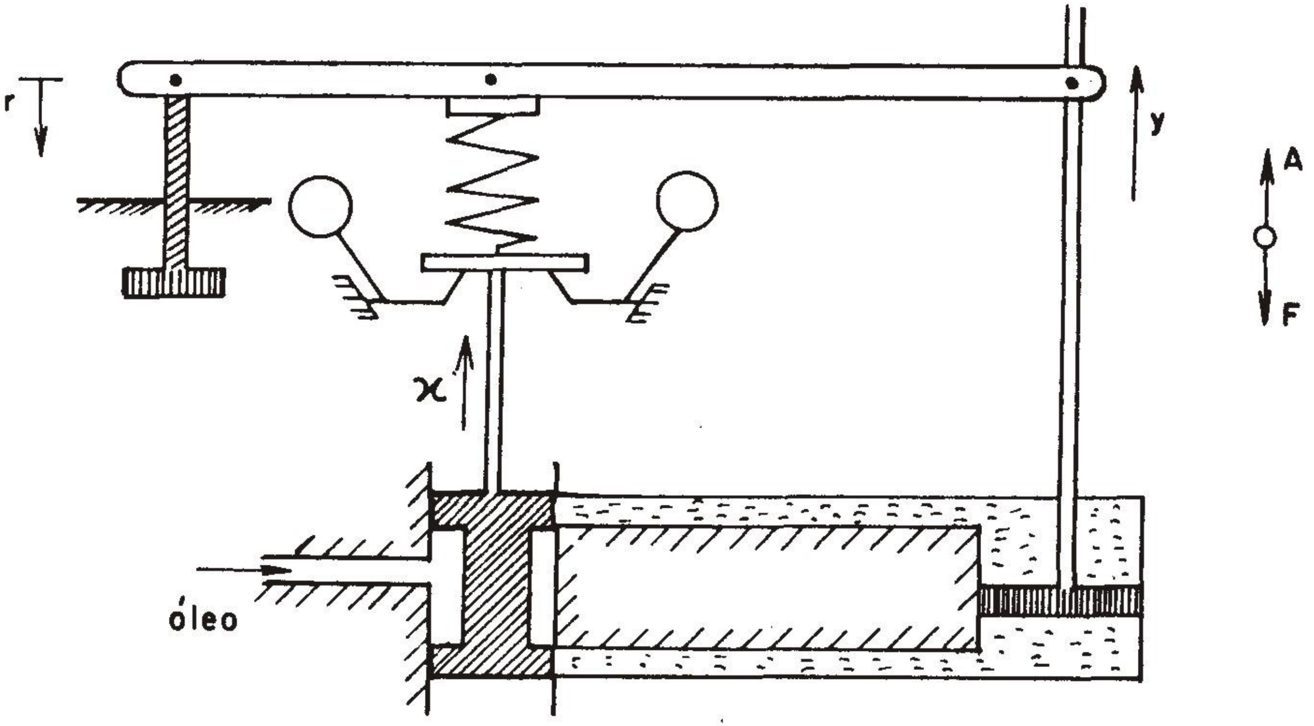
- Dois geradores:





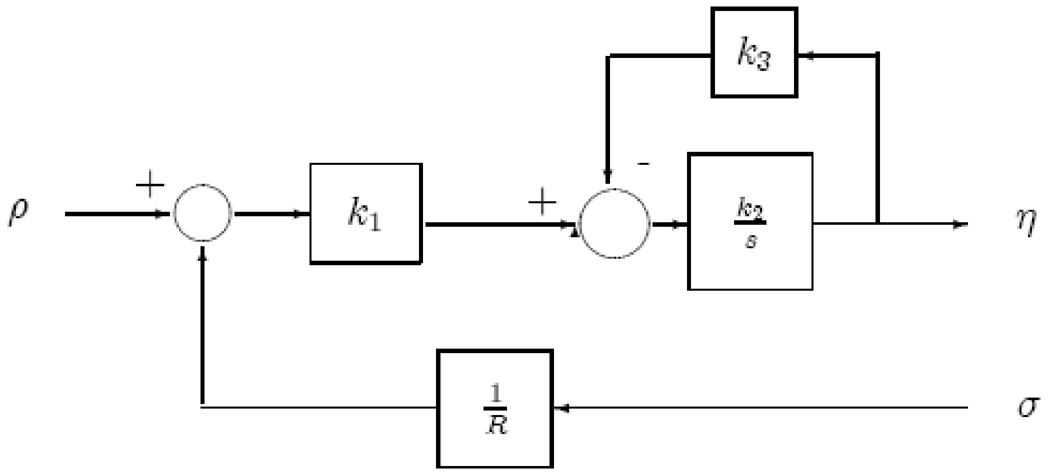
Regulador de Veloc. para Turbinas Térmicas

Regulador com Queda de Velocidade

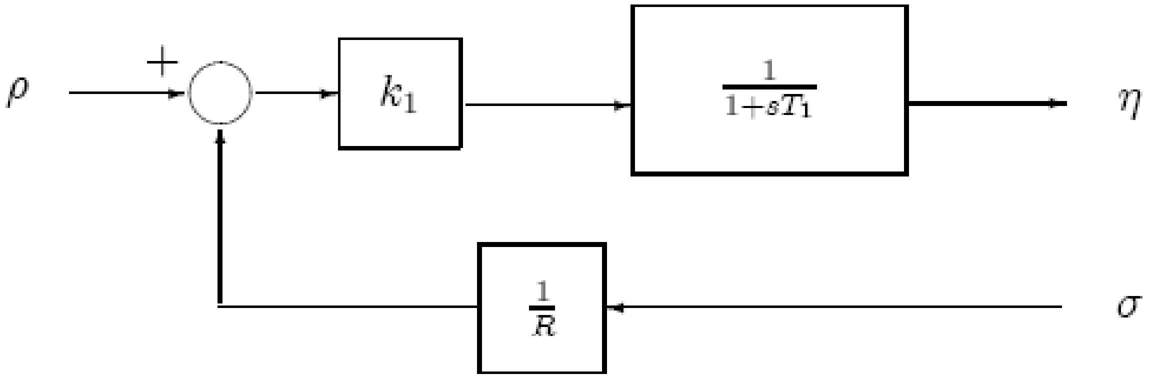


Regulador com Queda de Velocidade:
Diagrama de Blocos

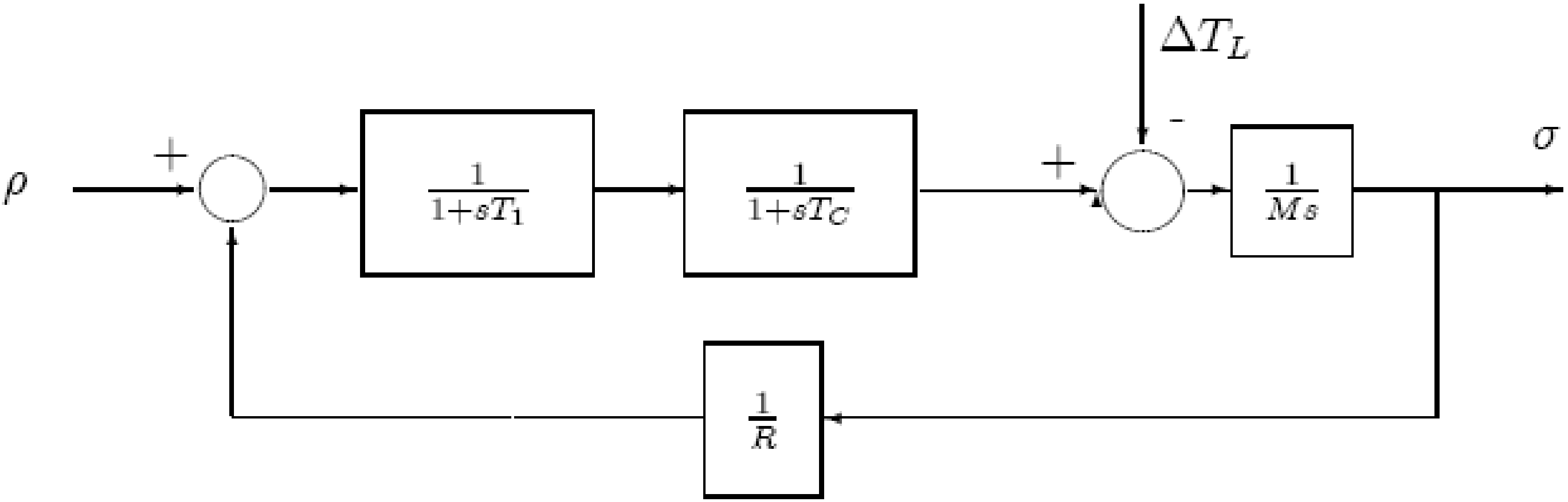
- Diagrama de blocos inicial:



- Diagrama de blocos reduzido:



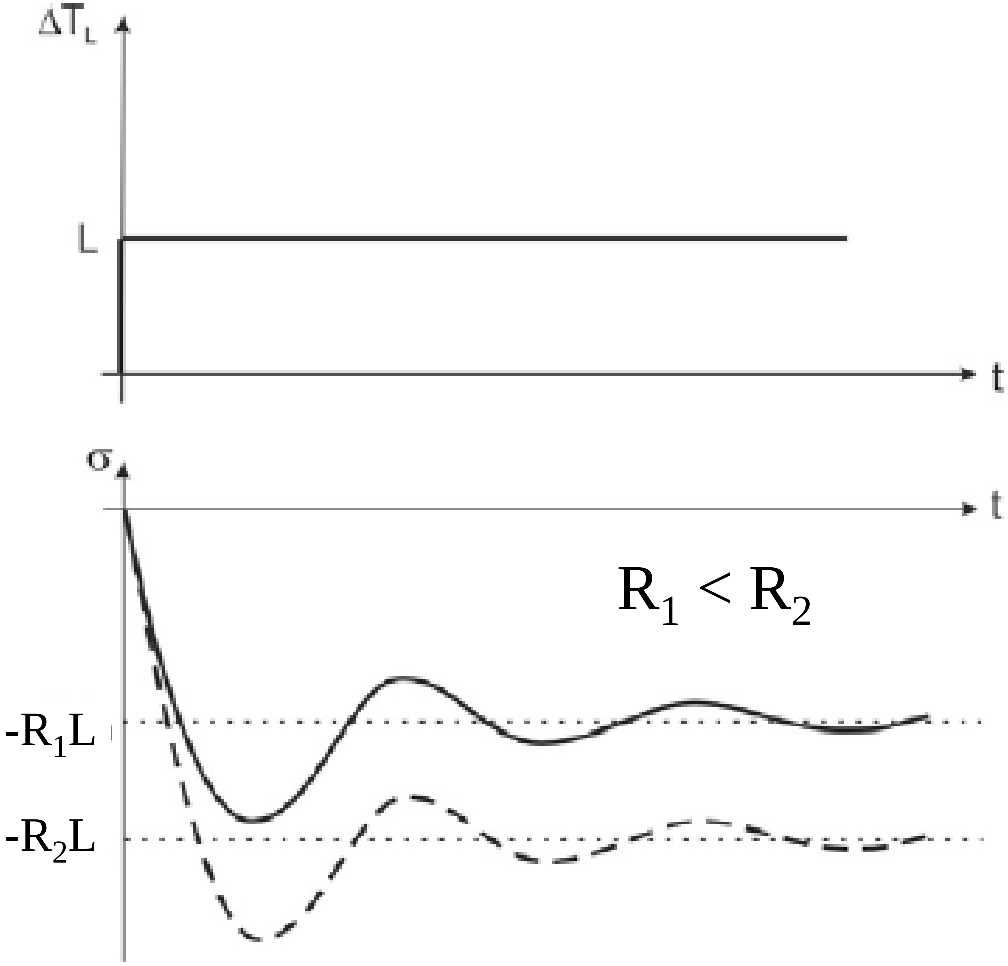
Controle Primário usando Regulador com Queda de Velocidade



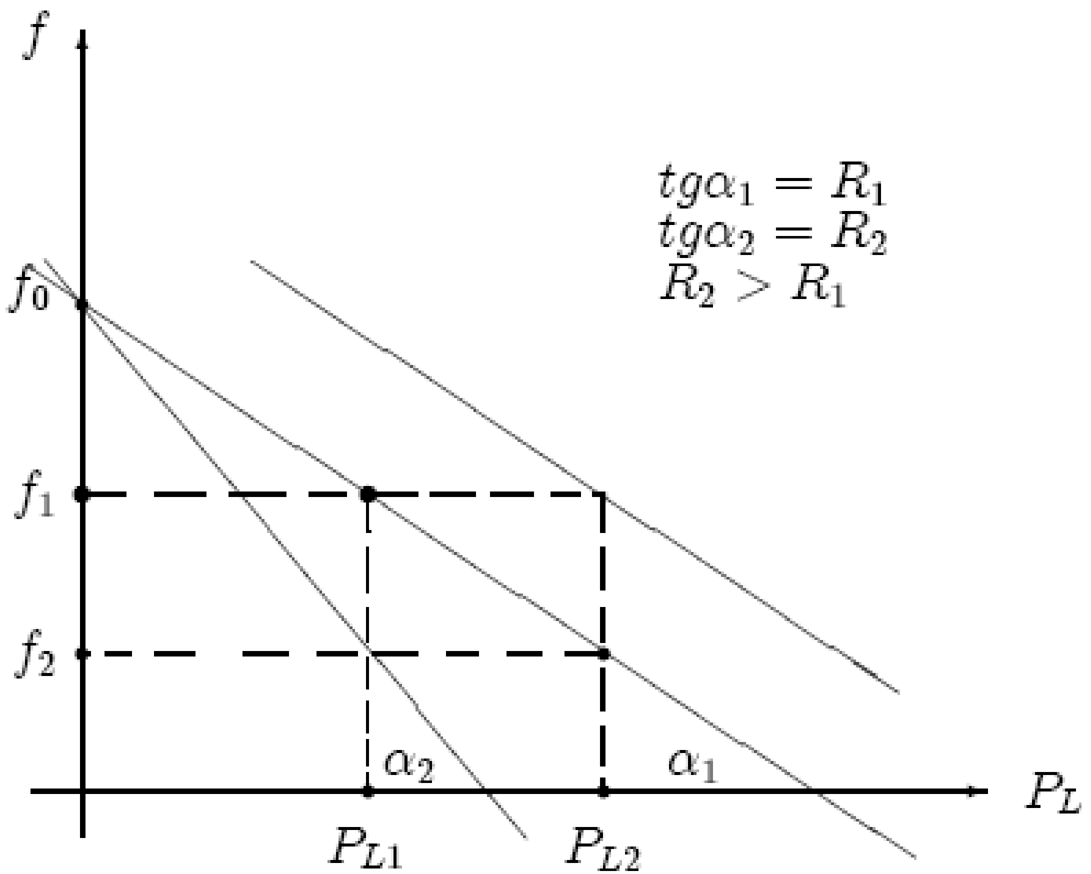
- Desvio de freqüência em regime permanente após degrau de carga de amplitude *L*:

$$\lim_{t\to\infty} \sigma(t) = \lim_{s\to 0} F_{\sigma L}(s) = -RL$$

Resposta Temporal a Degrau de Carga



Característica Estática



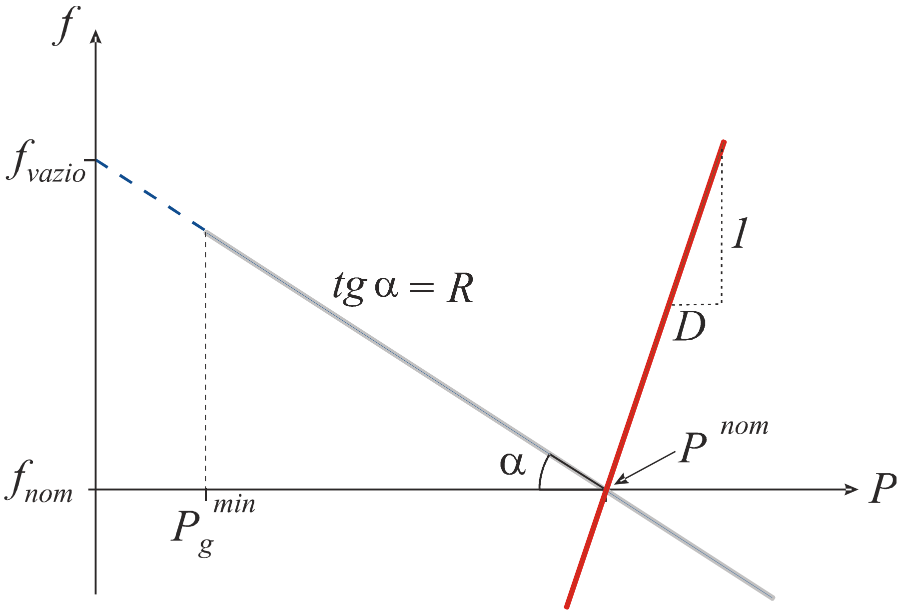
Controle de Frequência em Regime Perm.:

Efeito conjunto de Regulador e Carga

- Carga contribui para o equilíbrio
  - Variação da carga com a freqüência (D):

$$\Delta P_e = \Delta P_L + D\Delta f$$

  - Característica da carga:



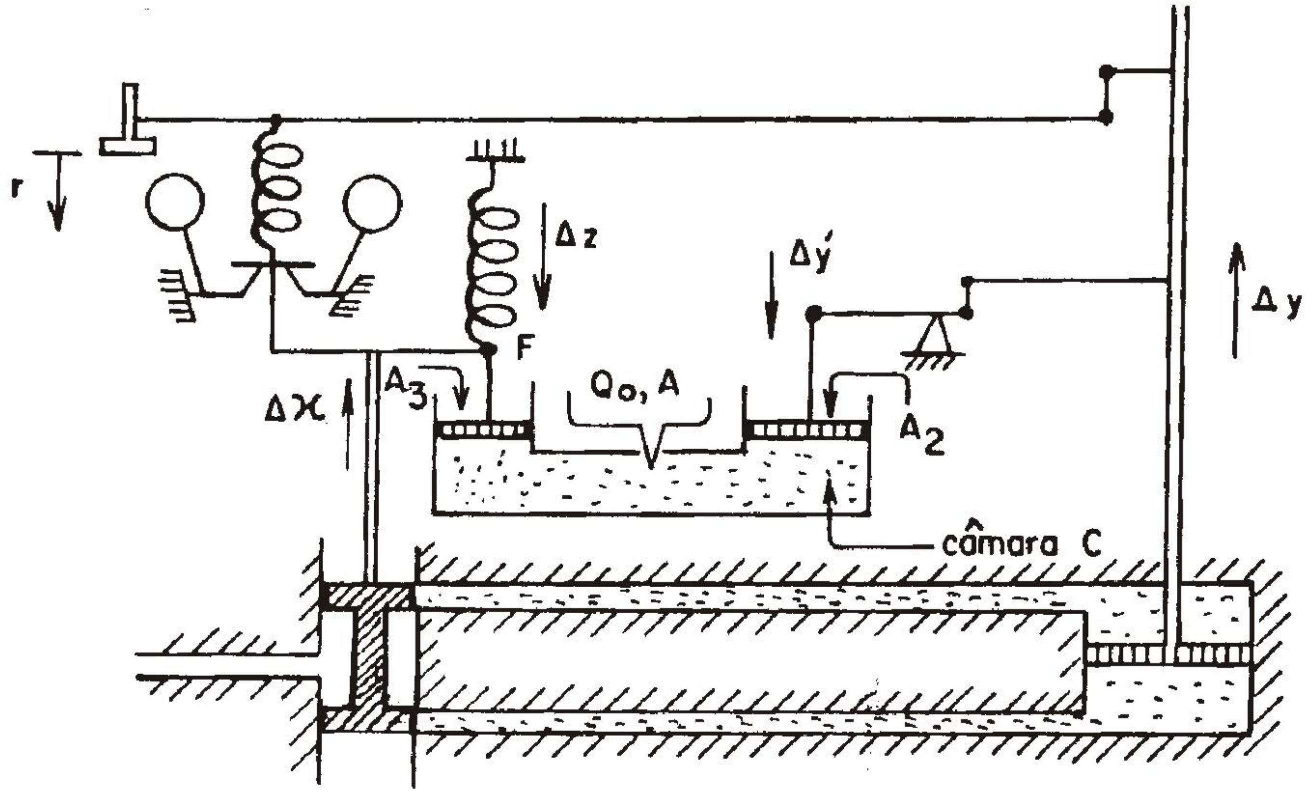
Controle de Velocidade de Turbinas Hidráulicas
Estatismo Transitório

- 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 $\Rightarrow$

$$r > R$$

Regulador de Velocidade para Turbinas Hidráulicas

- Inserção de mecanismo para redução do ganho transitório do regulador:



Função de transferência do RV para turbinas hidráulicas

$$\frac{\eta(s)}{\omega_{pu}(s)} = -\frac{1}{R} \times \frac{1 + sT_r}{(1 + sT_1)(1 + s\frac{r}{R}T_r)}$$

- Nas baixas frequências, comporta-se como um ganho ***1**/R*, isto é, como um regulador convencional;
- Nas altas frequências (transitório), comporta-se como um ganho ***1**/r*;
- Como *r >R,* o ganho transitório é reduzido.

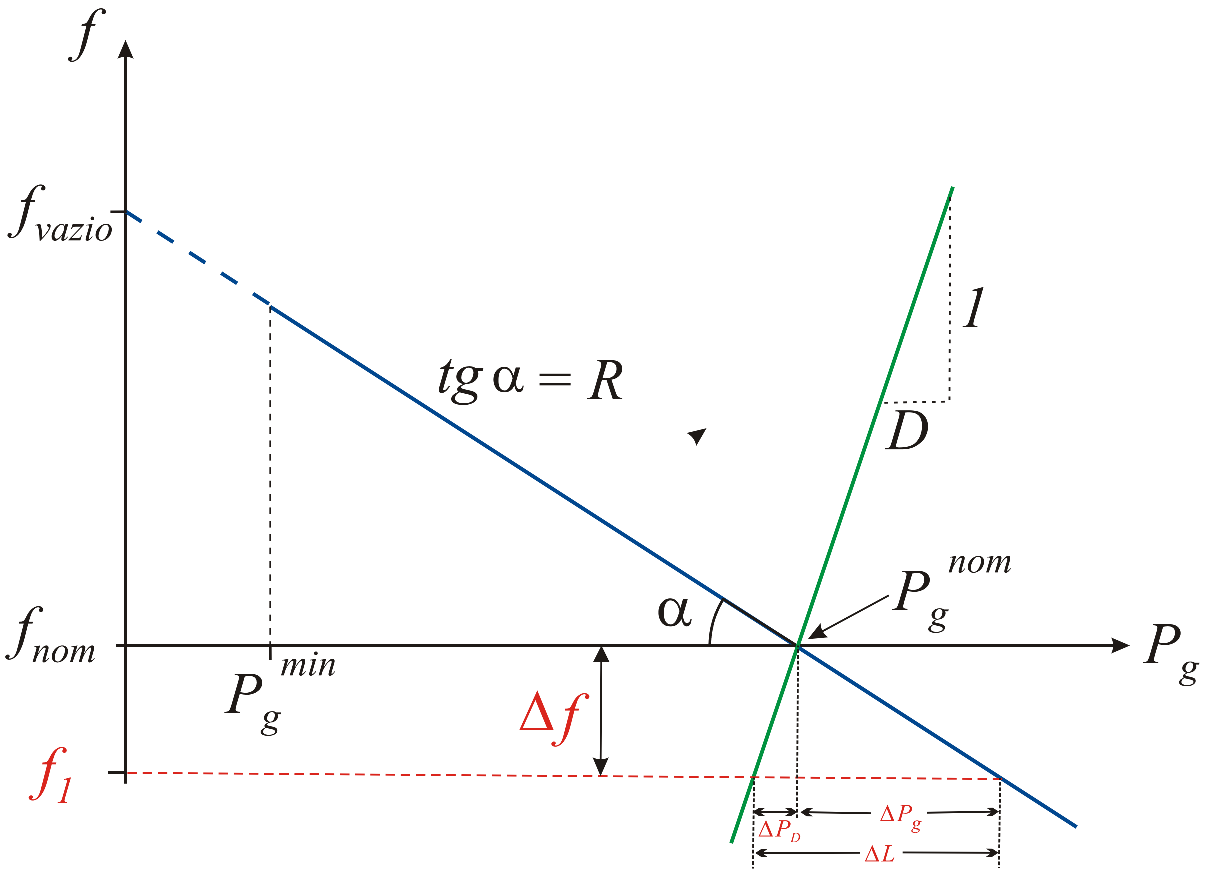
Regulação primária de frequência

- Resposta do sist. de contr. de freq. em malha fechada a perturbações de carga, com referência constante:
- Desprezando-se a dinâmica de turbina + regulador, chega-se à seguinte FT:

$$\frac{\Delta f(s)}{\Delta T_L(s)} = -\frac{1}{D + \frac{1}{R}} \times \frac{1}{1 + s(\frac{M}{D+\frac{1}{R}})}$$

- Com valores adequados de *R*, obtém-se baixos desvios de freq. em regime permanente e constantes de tempo muito menores do que no caso sem regulador.

Efeito conjunto do Estatismo e Sensibilidade da carga à frequência



$$\Delta L = \underbrace{D|\Delta f|}_{\Delta P_D} + \underbrace{\frac{1}{R}|\Delta f|}_{\Delta P_g} \quad \Rightarrow \quad \boxed{|\Delta f| = \frac{\Delta L}{D + \frac{1}{R}}}$$

Regulação Primária de Sistema Isolado: Desvio de frequência em Regime Perm.

- Sem Regulador
  - Desvio a um degrau de carga: $$\Delta f(\infty) = -\frac{\Delta L}{D}$$
  - Comentário: Desvio de freqüência é limitado apenas pela redução de carga com a queda de freqüência
- Com Regulador
  - Desvio a um degrau de carga: $$\Delta f(\infty) = -\frac{\Delta L}{D + \frac{1}{R}}$$
  - Comentários: Desvio de freqüência limitado não só por D, mas também pelo inverso do estatismo permanente

Regulação Primária de Sistema Isolado: Tempo de resposta

- Sem Regulador
  - Função de transferência: $$\frac{\Delta\omega(s)}{\Delta P_L(s)} = -\frac{1/D}{1+s(M/D)}$$
  - Comentário: tempo de resposta a 5% = $3M/D$
- Com Regulador
  - Função de transferência: (sem dinâmica de Reg.+Turb.) $$\frac{\Delta\omega(s)}{\Delta P_L(s)} = -\frac{1/(D+\frac{1}{R})}{1+s(\frac{M}{D+\frac{1}{R}})}$$
  - Comentário: tempo de resp. a 5% = $3M/(D+\frac{1}{R})$
  - Para valores usuais de R, $t_{com\_reg} << t_{sem\_reg}$

Regulação Primária de Sistema Isolado: Exemplo sem Regulador

- Seja: Pot. Nominal => Pn = 1000 kW
- Carga Nominal => PL = 500 kW
- Constante de Inércia => H = 2 s
- VariaçãoCarga/frequência => D = 1%

$$D = \frac{0{,}01 \times \frac{PL}{Pn}}{0{,}01 \times f_0} = \frac{500/1000}{60} = \frac{1}{120}\ pukW / Hz$$

- Para um incremento de carga => $\Delta L = 10kW = 0{,}01pu$
- Regulador Bloqueado:

$$\Delta f(\infty) = -\frac{\Delta L}{D} = -\frac{0{,}01}{1/120} = -1{,}2Hz$$

$$f(\infty) = f_0 + \Delta f(\infty) = 60 - 1{,}2 = 58{,}8Hz$$

Regulação Primária de Sistema Isolado: Exemplo com Regulador

- Seja: Pot. Nominal => Pn = 1000 kW
- Carga Nominal => PL = 500 kW
- Constante de Inércia => H = 2 s
- Variação Carga/freqüência => D = 1/120 pu kW / Hz
- Estatismo => R = 5 %

$$R = \frac{0{,}05\,puHz}{pu\,kW} = \frac{0{,}05 \times 60\,Hz}{pu\,kW} = 3{,}0\,\frac{Hz}{pu\,kW}$$

- Para um incremento de carga => $\Delta L = 10kW = 0{,}01pu$

- Regulação Primária:

$$\Delta f(\infty) = -\frac{\Delta L}{D + R^{-1}} = -\frac{0{,}01}{1/120 + 1/3} = -0{,}0293Hz$$

$$f(\infty) = f_0 + \Delta f(\infty) = 60 - 0{,}0293 = 59{,}9707\,Hz$$

Regulação Primária de Sistema Isolado:

Comentários sobre Exemplo com Regulador

- O atendimento ao degrau de carga é composto de 3 componentes:
  - Energia 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:

$$\Delta Pm(\infty) = -\frac{1}{R} \times \Delta f(\infty) = \frac{0{,}0293 \times 1000}{3{,}0}\, kW = 9{,}766\, kW$$

$$\Delta PL(\infty) = -D \times \Delta f(\infty) = \frac{0{,}0293 \times 1000}{120}\, kW = 0{,}244\, kW$$

$$\Delta Pm(\infty) + \Delta PL(\infty) = 9{,}766 + 0{,}244 = 10\, kW = \Delta L$$

Regulação Primária de Sistema Isolado

Tempos de resposta

- Tempo de resposta com regulador bloqueado:

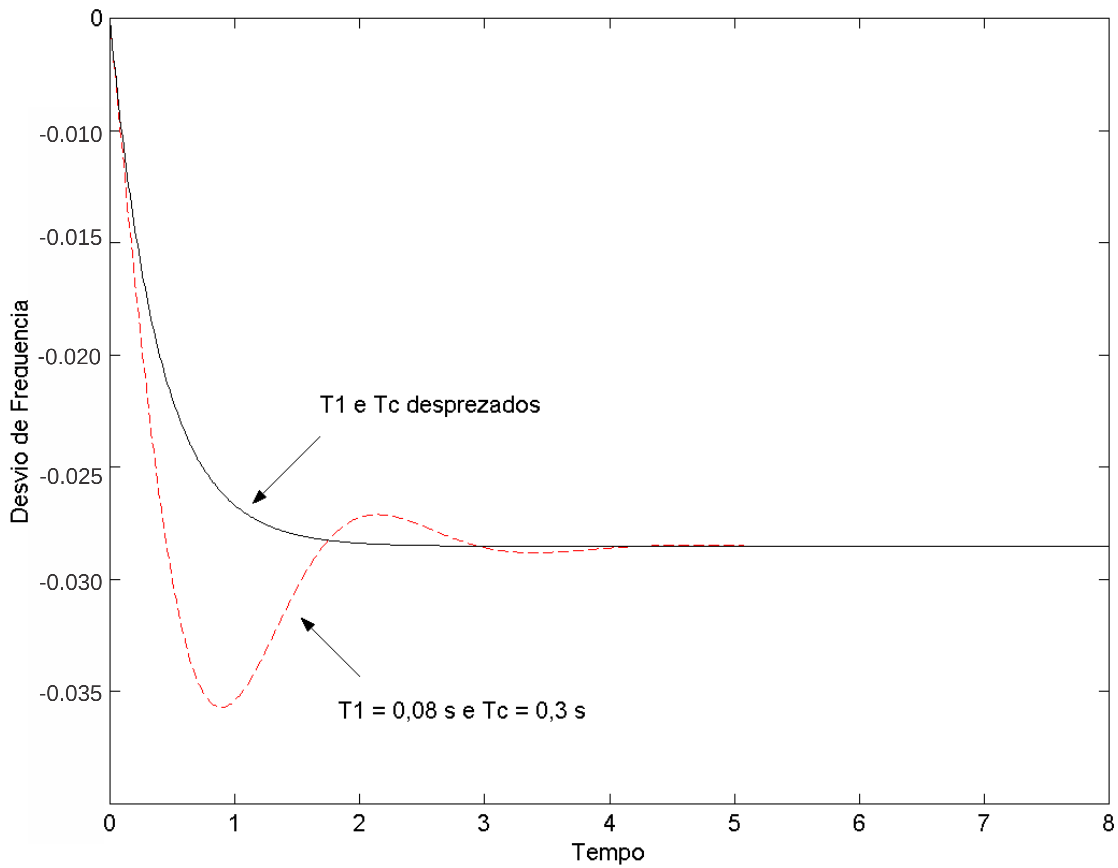
$$t_r{}^{5\%} = \frac{3M}{D} = \frac{3(1/15)}{1/120} = 24\ \mathrm{s}$$

- Tempo de resposta com regulador operante:

$$t_r{}^{5\%} = \frac{3M}{D + R^{-1}} = \frac{3(1/15)}{\left(\frac{1}{120}\right) + \left(\frac{1}{3}\right)} = 0{,}1951\ \mathrm{s}$$

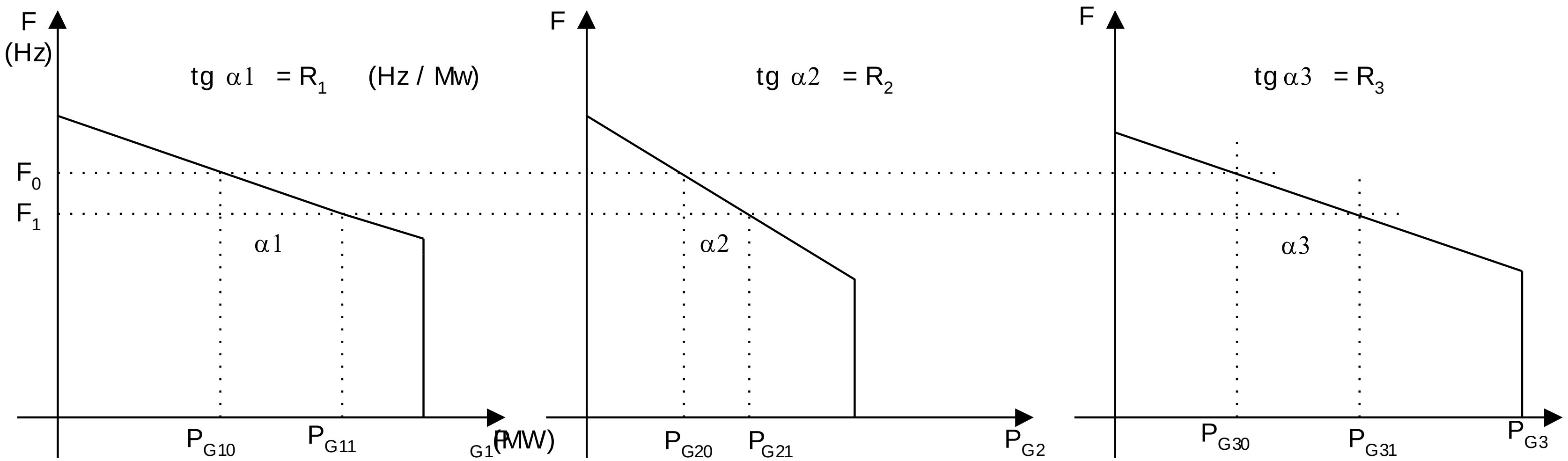
Regulação Primária de Sistema Isolado

Resposta Transitória

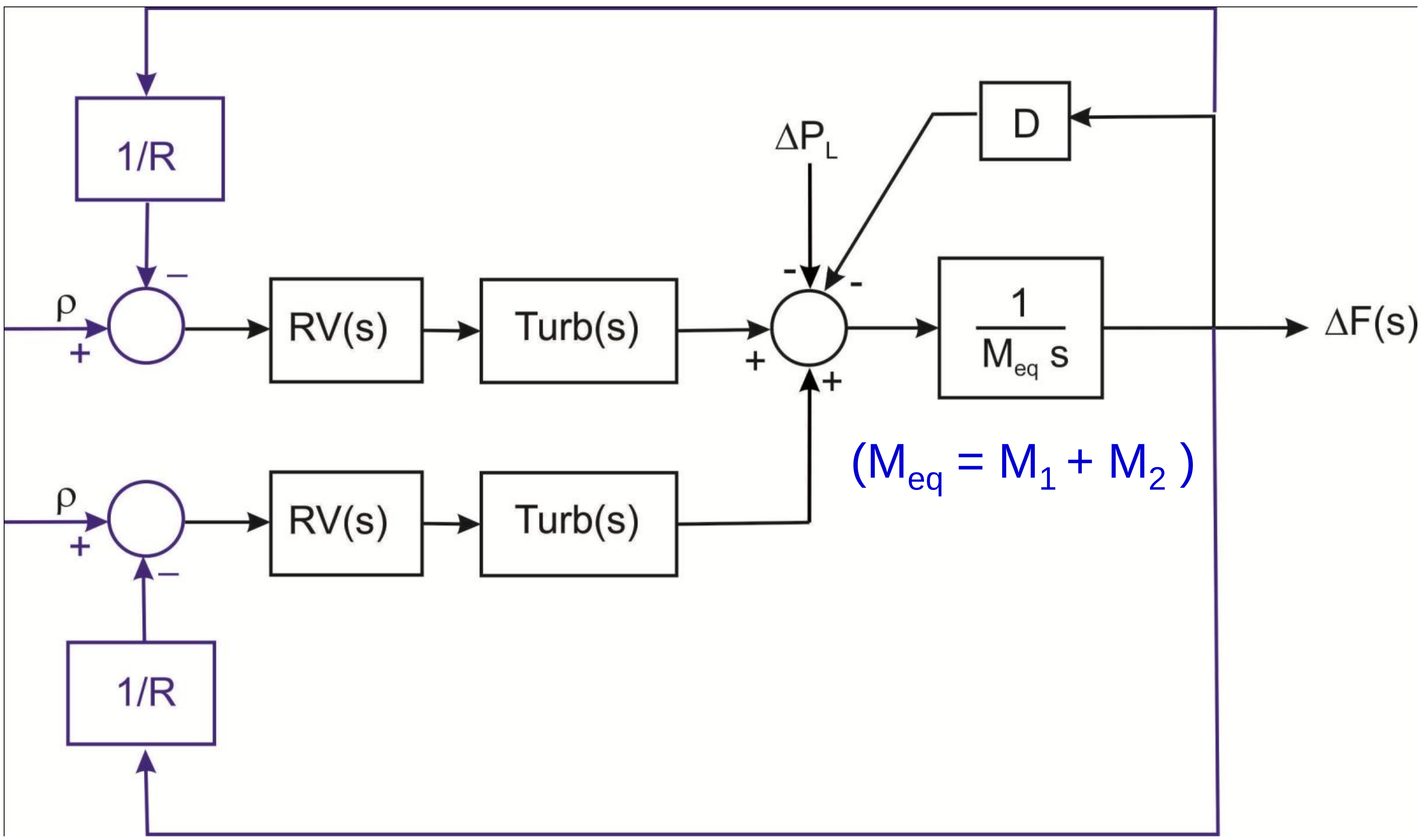


Regulação Primária: Sistema Multimáquinas

- 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: $F_1 \neq F_0$



Regulação primária de rede isolada
Diagrama de blocos para sistema de 2 máquinas



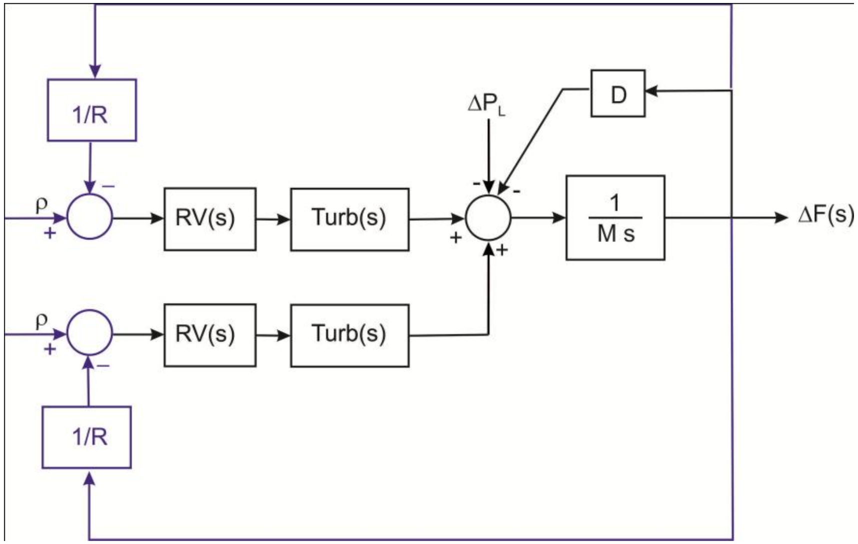
Regulação primária para sistema isolado com duas máquinas

- Balanço de potência em reg. perm. para $\Delta P_L = L/s$:

$$(-\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} - D)\Delta f(\infty) = \Delta L$$

ou

$$\left[\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) + D\right] \Delta f(\infty) = -\Delta L$$



Definindo: $$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

$$\Delta f(\infty) = -\frac{\Delta L}{D + \frac{1}{R_{eq}}}$$

Regulação primária para sistema isolado multi-máquinas: Exemplo (I)

Uma microrrede dispõe de duas unidades geradoras, de 100 e 300 kW, para suprir carga de 200 kW. Dados:

- D=0,5 p.u. (na base de 100 kVA, 60 Hz);
- Estatismos iguais a 5% na base de cada máquina;
- Máquinas 1 e 2 ajustadas para fornecer 50 kW e 150 kW à frequência nominal, respectivamente;

Considerando-se um súbito aumento de carga de 50 kW, determinar:

a) desvio de frequência em regime;

b) *a*créscimo de geração em cada unidade.

Regulação primária para sistema isolado multi-máquinas: Exemplo (II)

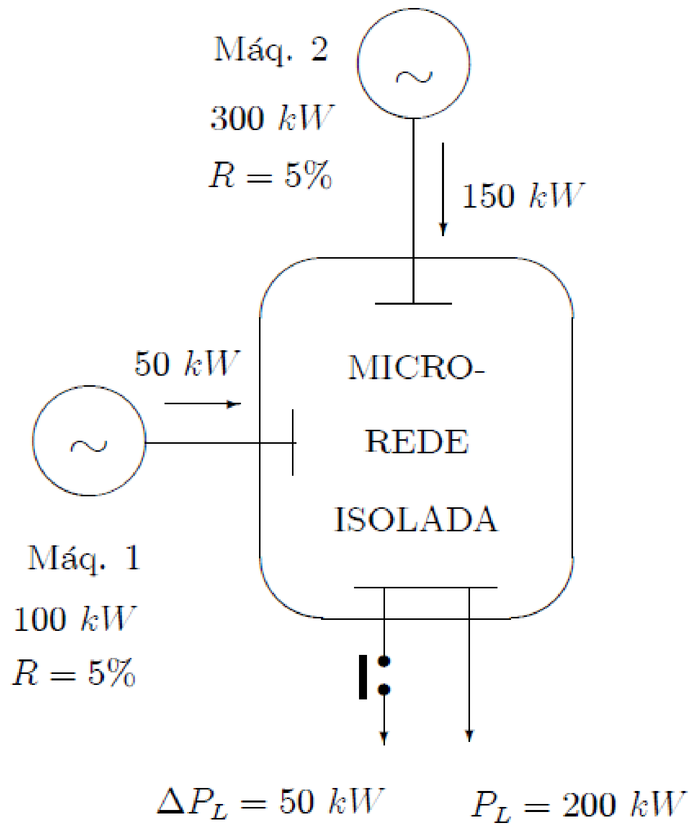
- **Solução:** adotando base de 100 kW e mantendo freq. em *pu:*

$$\left(\frac{1}{R_1}\right)_{100} = \frac{1}{0{,}05} = 20\ pu$$

$$\left(\frac{1}{R_2}\right)_{100} = \left(\frac{1}{R_2}\right)_{300} \times \frac{300}{100} = 60\ pu$$

$$\left(\frac{1}{R_{eq}}\right)_{100} = 20 + 60 = 80\ pu$$

$$(D)_{100} = 0,5\ pu \quad \Delta L = \frac{50}{100} = 0,5\ pu$$



- Logo:

$$\Delta f(\infty) = -\frac{0{,}5}{0{,}5+80} = -0,00621\ pu$$

$$\Delta f(\infty) = -0,00621\ pu \times 60 = \mathbf{-0,3726\ Hz}$$

$$f(\infty) = 60 - 0,3726 = 59,6274\ Hz$$

Regulação primária para sistema isolado multi-máquinas: Exemplo (III)

- Potência gerada total e efeito da sensibilidade da carga:

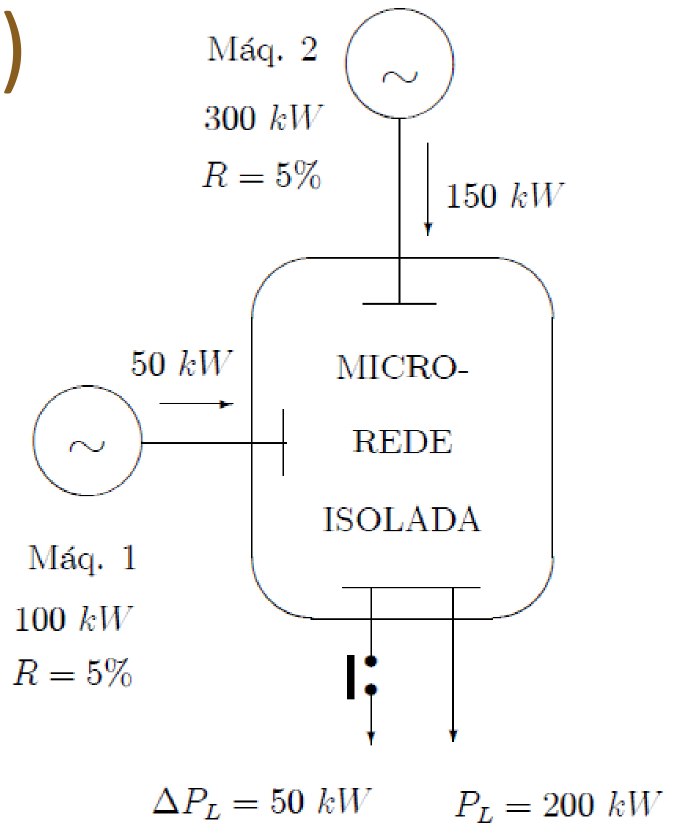
$$
\begin{aligned}
\Delta P_G &= -\frac{1}{R_{eq}} \times \Delta f(\infty) &&= 80 \times 0,00621 \\
&= 0,497\ pu &&= \mathbf{49,7\ kW}
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
\Delta P_D &= -D \times \Delta f(\infty) &&= 0,5 \times 0,00621 \\
& 0,003105\ pu &&= \mathbf{0,3\ kW}
\end{aligned}
$$

- Acréscimo de geração em cada unidade:

$$
\begin{aligned}
\Delta P_{G_1} &= -\frac{1}{R_1} \times \Delta f(\infty) &&= 20 \times 0,00621 \\
&= 0,1242\ pu &&= \mathbf{12,4\ kW}
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
\Delta P_{G_2} &= -\frac{1}{R_2} \times \Delta f(\infty) &&= 60 \times 0,00621 \\
&= 0,373\ pu &&= \mathbf{37,3\ kW}
\end{aligned}
$$



Note que:

$$
\begin{aligned}
\Delta P_{G_1} &\approx \frac{100}{100+300} \times 50 &&= 12,5\ MW \\
\Delta P_{G_2} &\approx \frac{300}{100+300} \times 50 &&= 37,5\ MW
\end{aligned}
$$

Regulação primária para sistema isolado multi-máquinas: Exemplo (IV)

- Interpretação gráfica:

$$\tan \boldsymbol{\alpha} = \boldsymbol{R_{eq}} = \mathbf{0,0125}\ \boldsymbol{pu}$$

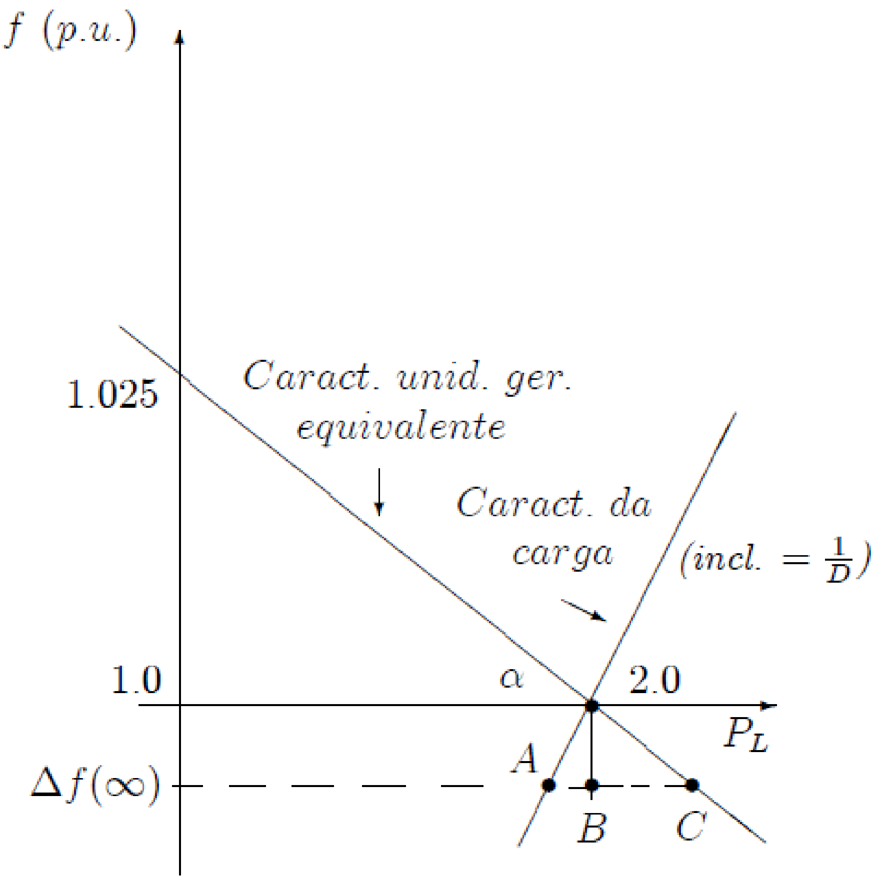
$$\frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{D}} = \mathbf{2,0}\ \boldsymbol{pu}$$

$$\Delta \boldsymbol{f} = -\mathbf{0,0621}\ \boldsymbol{pu}$$

$$\boldsymbol{BC} = \Delta \boldsymbol{P_G} = \mathbf{0,497}\ \boldsymbol{pu}$$

$$\boldsymbol{AB} = \Delta \boldsymbol{P_D} = \mathbf{0,003}\ \boldsymbol{pu}$$

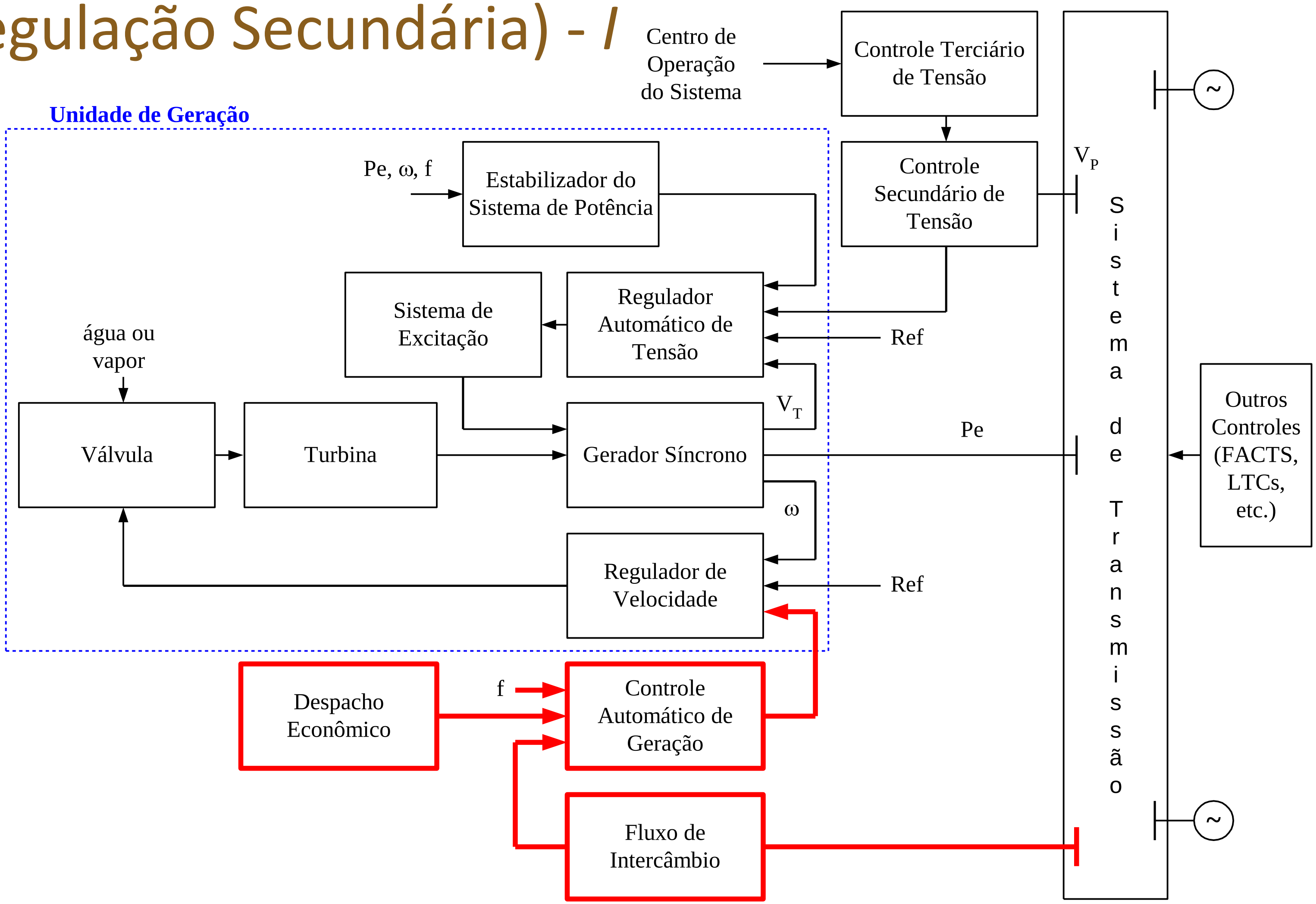
$$\boldsymbol{AC} = \Delta \boldsymbol{L} = \mathbf{0,500}\ \boldsymbol{pu}$$



II – Controle Secundário de Frequência

Controle Secundário de Frequência

(Regulação Secundária) - I



Controle Secundário de Frequência (Regulação Secundária) - *II*

- Complementar à regulação primária;
- Erro de frequência nulo em regime;
- Atua no deslocamento da referência dos reguladores de velocidade dos geradores;
- Pode atuar sobre vários geradores simultaneamente;
- Deve ser um controle centralizado.

Controle Secundário de Freq. para Sist. Isolado:
Controle integral

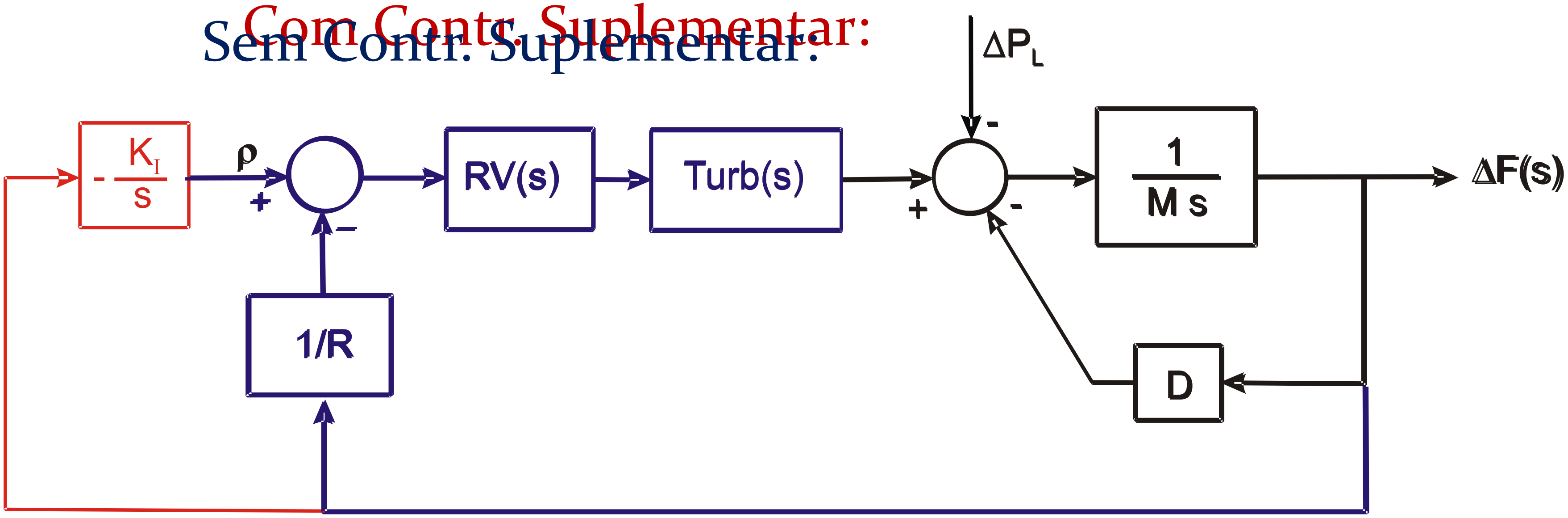
- Objetivo: erro de frequência nulo em regime permanente;
- Para isso, é necessária uma ação de controle suplementar sobre a referência do regulador;
- Referência do RV é ajustada mediante ação integral:

$$\rho(t) = -K_I \int_0^t \Delta f(\tau)\, d\tau \;\Rightarrow\; \rho(s) = -\frac{K_I}{s}\Delta F(s)$$

Controle Secundário de Freq. para Sist. Isolado:
Diagrama de Blocos

Com Contr. Suplementar:

Sem Contr. Suplementar:



Controle Secundário de Freq. para Sist. Isolado: *FT* e Desempenho Estático

- *FT* relacionando desvio de frequência e perturbação de carga (com $T_1 = T_c = 0$):

$$\frac{\Delta F(s)}{\Delta P_L(s)} = -\frac{1}{M} \times \frac{s}{s^2 + \left(\frac{D}{M} + \frac{1}{RM}\right) s + \frac{K_I}{M}}$$

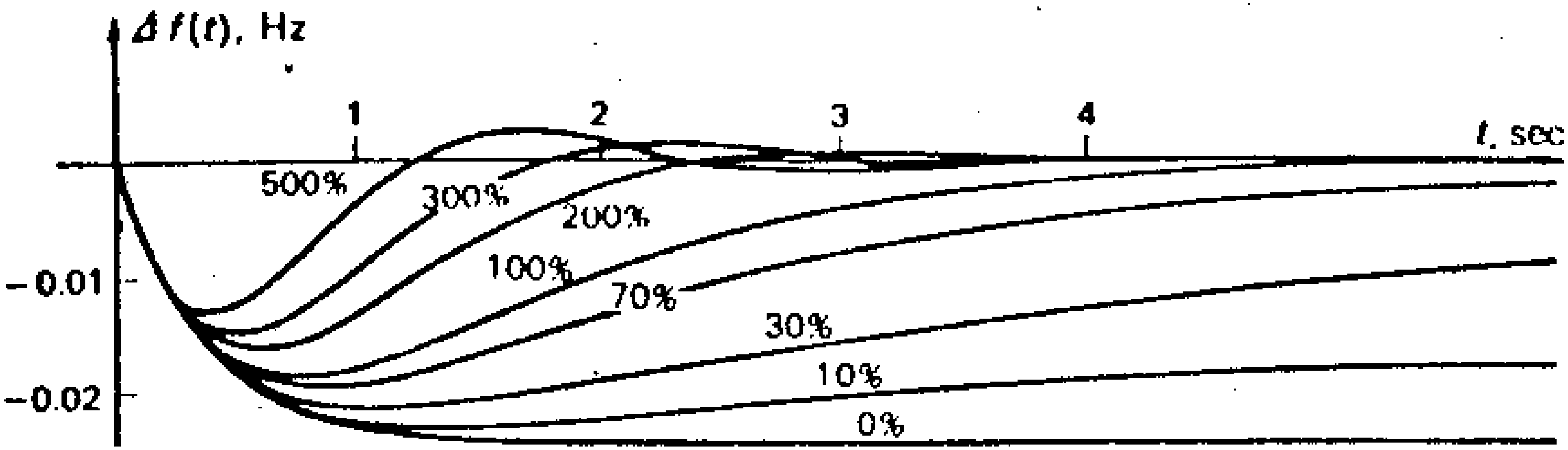
- Pelo Teorema do Valor Final, a presença do zero na origem garante que, sendo o sistema estável,

$$\Delta f(\infty) = 0$$

para perturbações do tipo degrau de carga.

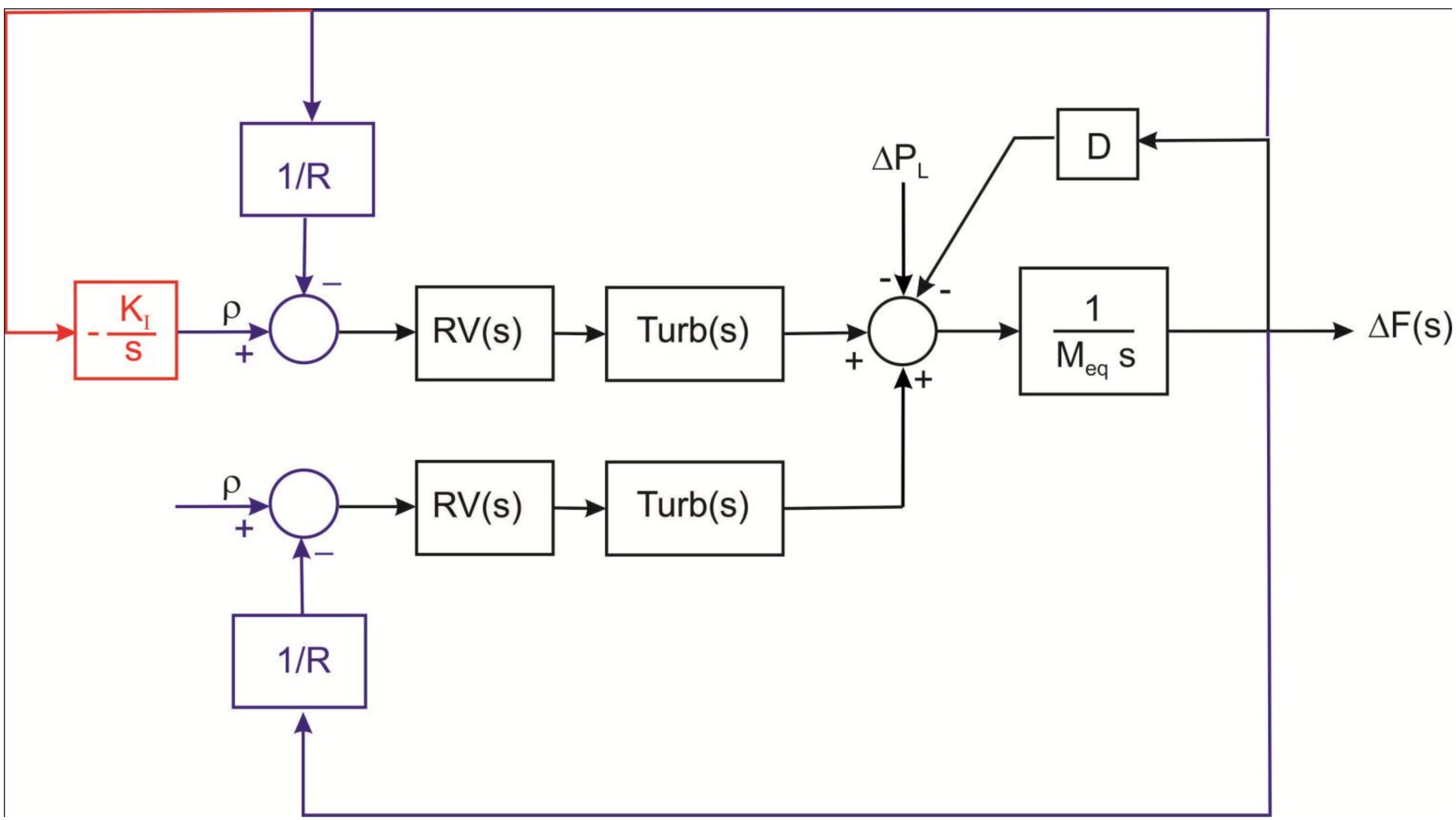
Controle Secundário de Freq. para Sist. Isolado:
Desempenho transitório

- Fortemente dependente do parâmetro K_I;
- *Respostas para* K_I variável, parametrizado por K_{Icrit} (valor crítico, correspondente a $\zeta = 1$):



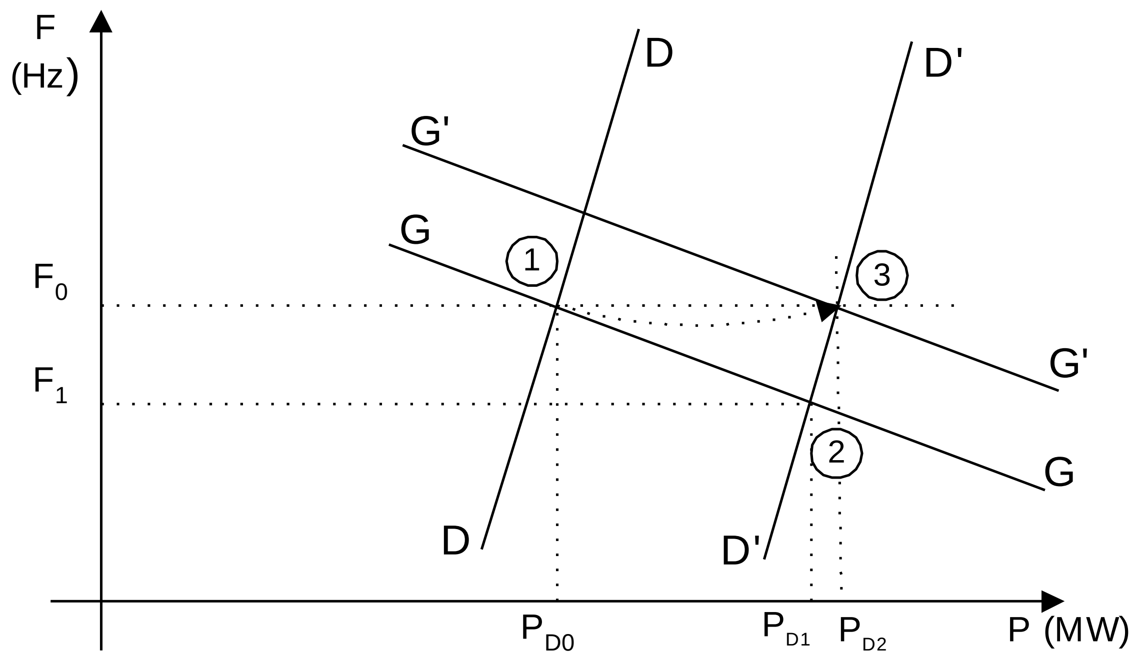
Controle Secundário de Frequência para Sistema Isolado Multi-máquinas

- Controle suplementar não necessariamente é exercido sobre todas as unidades geradoras disponíveis:



Ação dos Controles Primário e Secundário:

Características de Geração e Carga



- Havendo um acréscimo de carga, esta evolui de P_{D0} em F_0 (Ponto 1) até P_{D1} em $F_1 < F_0$ (Ponto 2) por ação dos reguladores de velocidade das turbinas do sistema (característica G-G) e pela característica da carga D-D que se desloca para D′-D′. Para restabelecer a frequência a F_0 é preciso efetuar o controle suplementar consistindo em elevar a característica de geração de G-G para G′-G′ quando então a carga volta a ser alimentada na frequência F_0 (Ponto 3).