Ajuste de Reguladores de Velocidade de Turbinas Hidráulicas

ENGENHARIA
ELÉTRICA

GSP

Características do Controle de Velocidade de Turbinas Hidráulicas

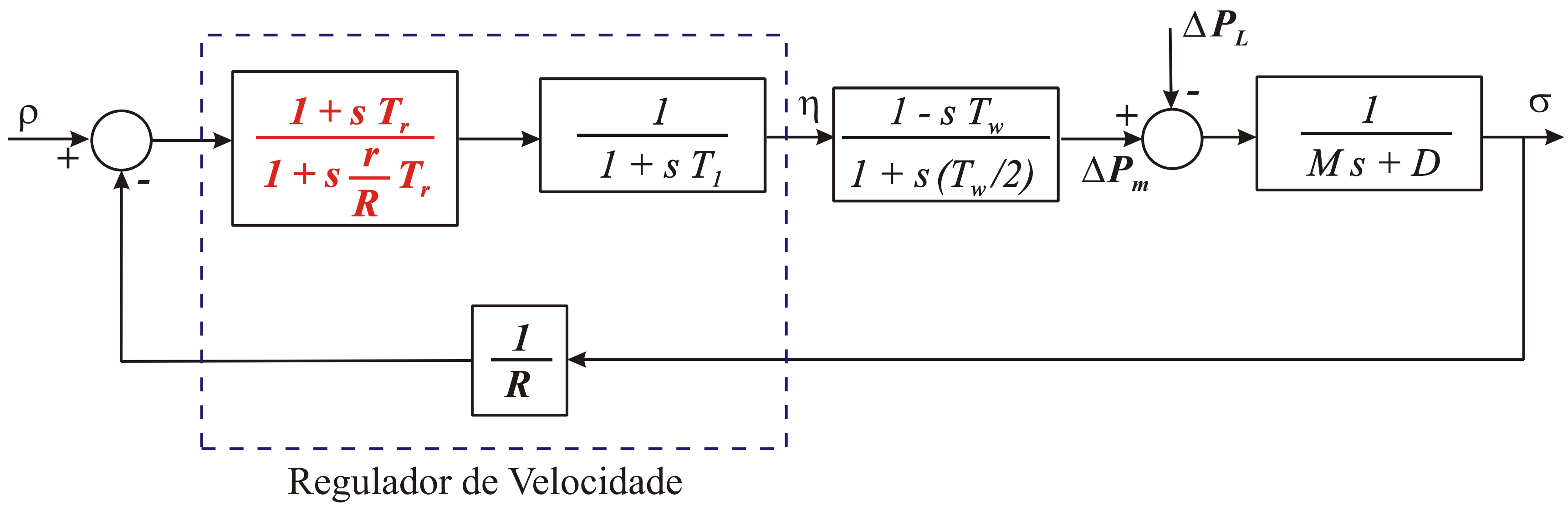
- Resposta Inversa da Turbina:
  - Necessidade de redução de ganho transitório;
  - Redução de ganho transitório em reguladores hidráulico-mecânicos.
- Função de Transferência do RV:

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

- Parâmetros ajustáveis:
  - Estatismo transitório, r;
  - Parâmetro de tempo do zero, T_r.

Condições de Operação para Ajuste de Parâmetros

- Diagrama de blocos:



- Condição de operação que deve ser considerada:
  - Gerador isolado;
  - Operação à plena carga.

Ajuste Convencional

- Freqüência de cruzamento de ganho para sistema compensado:

$$\omega_1^c = \frac{0,4}{T_W}$$

- Estatismo Transitório:

$$r = 2,5\frac{T_W}{M}$$

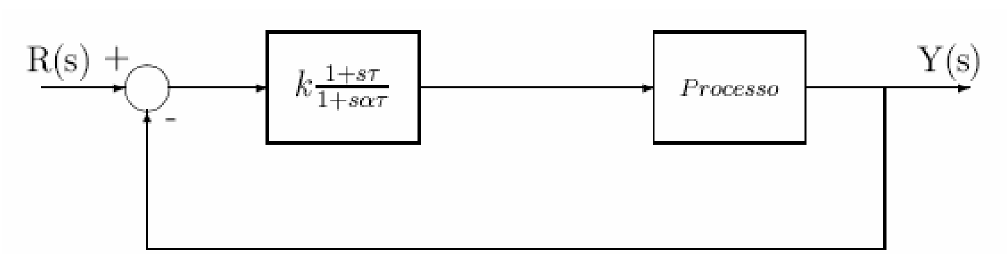
- Parâmetro de tempo T_r :

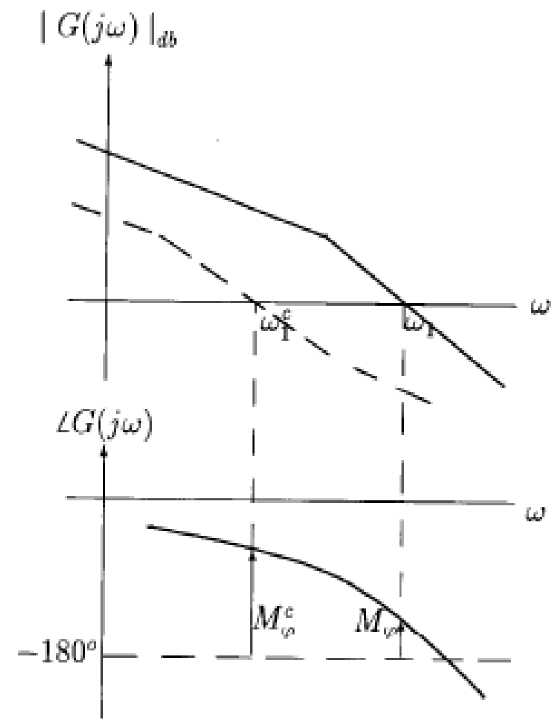
$$T_r = \frac{1}{\omega_1^c} \times \left[\frac{(r/R)-1}{0,536(r/R)} + \sqrt{(\frac{(r/R)-1}{0,536(r/R)})^2 - \frac{R}{r}}\right]$$

Projeto no Domínio da Freqüência

- Baseado no uso de um <u>compensador de atraso de fase</u>;

- Compensação por atraso de fase:





Etapas do Projeto

1) Traçar diagramas de Bode da FT $F(j\omega)$ do sistema não-compensado com ganho já ajustado para precisão desejada;

2) Se $M\phi$ é insuficiente, determinar freq. ω_1^c em que a $M\phi$ especificada seria atendida se $| F(j\,\omega_1^c)|_{dB} = 0\ dB$. Deixar $\approx 15^o$ de folga para acomodar atraso de fase do compensador;

3) Medir atenuação α necessária em ω_1^c p/. que $| F^{comp}(j\,\omega_1^c)|_{dB} = 0\ dB$;

4) Posicionar zero da FT $C(j\omega)$ do compensador de tal forma que a folga do item 2 seja satisfeita, i. é, $\angle C(j\,\omega_1^c) \approx -15^o$;

5) Calcular pólo do compensador tal que $\omega_p = \omega_z / \alpha$.

Exemplo

- Para um hidrogerador cujos dados são:

$T_w = 2,0$ s; $D = 1,0$ s; $T_1 = 0,5$ s

$M = 10,0$ s; $R = 0,05$.

projetar um regulador de velocidade para que a margem de fase do sistema compensado seja de aproximadamente 40º.

FTs do Processo e Controlador

- FT do processo (sistema não-compensado):

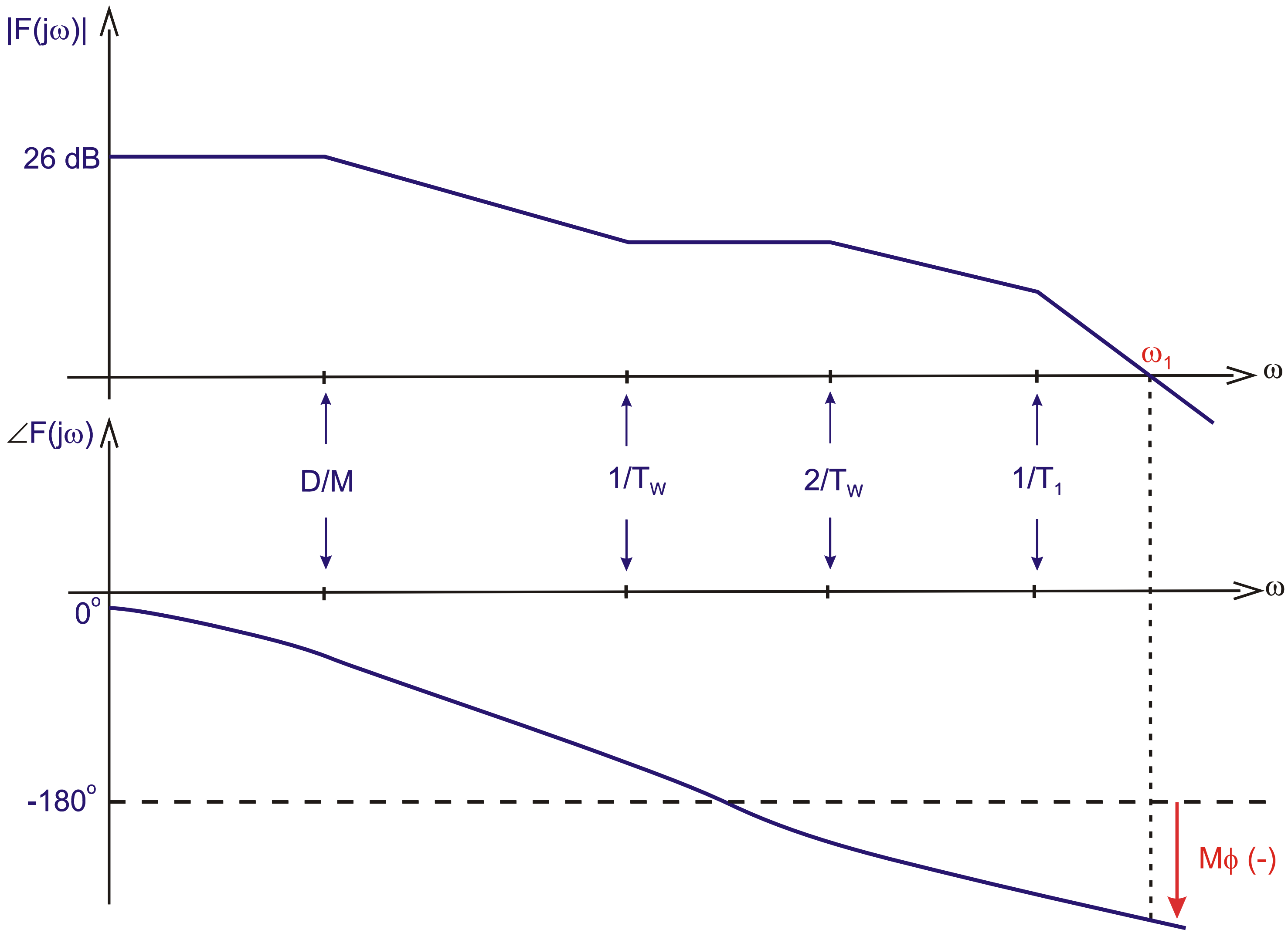
$$F(s) = \frac{1 - sT_w}{R\ D\ (1 + sT_1)(1 + s\frac{T_w}{2})(1 + s\frac{M}{D})}$$

- Compensador:

$$C(s) = \frac{1 + sT_r}{1 + s\frac{r}{R}T_r} \quad \Rightarrow \quad C(j\omega) = \frac{1 + j\omega T_r}{1 + j\omega\frac{r}{R}T_r}$$

- Para $\omega \gg \frac{R}{r}T_r$, temos que $C(j\omega) \simeq \frac{R}{r}$.

Diagramas de Bode do Sistema Não-compensado



Sistema Compensado

- FTMA do sistema compensado:

$$F^{Comp}(j\omega) = C(j\omega)F(j\omega)$$

- F^{Comp} pode ser aproximada como:

$$F^{Comp}(j\omega) \simeq \frac{R}{r} \times \frac{1 - sT_w}{R\ D\ (1 + sT_1)(1 + s\frac{T_w}{2})(1 + s\frac{M}{D})}$$

ou

$$F^{Comp}(j\omega) = \frac{1 - j\omega T_w}{r\ D\ (1 + j\omega T_1)(1 + j\omega\frac{T_w}{2})(1 + j\omega\frac{M}{D})}$$

Cálculo de ω_1^c - Método Exato

- $\angle F^{Comp}(j\omega_1^c) = -180^o + (40^o + 15^o) = -125^O$
- Como

$$F^{Comp}(j\omega) = \frac{1 - j\omega T_w}{r\ D\ (1 + j\omega T_1)(1 + j\omega\frac{T_w}{2})(1 + j\omega\frac{M}{D})}$$

- Tem-se que:

$$-tg^{-1}(\omega_1^c T_w) - tg^{-1}(\omega_1^c T_1) - tg^{-1}(\omega_1^c T_w/2) - tg^{-1}(\omega_1^c M/D) = -125^o$$

- Resultando em

$$\boxed{\omega_1^c = 0{,}288 \text{ rad/s}}$$

Determinação do Estatismo Transitório

- Na freqüência de cruzamento de ganho:

$$\left| F^{Comp}(j\omega_1^c) \right| = 1,0$$

- ou

$$\left| \frac{1 - j\omega T_w}{r\ D\ (1 + j\omega T_1)(1 + j\omega \frac{T_w}{2})(1 + j\omega \frac{M}{D})} \right| = 1,0$$

- o que fornece:

$$\boxed{r = 0,364}$$

Aproximações adicionais:

- $(D/M) \ll \omega_1^c \Rightarrow \begin{cases} \angle\left(\frac{1}{(1+j\omega\frac{M}{D})}\right) \approx -90^o \\ \left|\frac{1}{(1+j\omega\frac{M}{D})}\right| \approx \frac{D}{\omega\ M} \end{cases}$

- $(1/T_1) \gg \omega_1^c \Rightarrow \begin{cases} \angle\left(\frac{1}{(1+j\omega T_1)}\right) \approx 0^o \\ \left|\frac{1}{(1+j\omega T_1)}\right| \approx 1,0 \end{cases}$

Cálculo Aproximado de ω_1^c

- Com as aproximações anteriores:

$$\angle F^{Comp}(j\omega_1^c) = -90^o - tg^{-1}(\omega_1^c T_w) - tg^{-1}(\omega_1^c T_w/2) = -125^o$$

$$tg^{-1}(\omega_1^c T_w) + tg^{-1}(\omega_1^c T_w/2) = 35^o$$

- Supondo ainda que:

$$\begin{aligned} tg^{-1}(\omega_1^c T_w) &\approx \omega_1^c T_w \\ tg^{-1}(\omega_1^c T_w/2) &\approx \omega_1^c T_w/2 \\ 35^o &\approx 0,6\ rad \end{aligned}$$

- Obtém-se:

$$\frac{3}{2}\omega_1^c T_w = 0,6 \quad \Rightarrow \quad \boxed{\omega_1^c = \frac{0,4}{T_w}\ rad/s}$$

Cálculo Aproximado de *r*

- Com as aproximações anteriores para os módulos:

$$\left| \frac{1 - j\omega_1^c T_w}{r\ D\ (1 + j\omega_1^c \frac{T_w}{2}) \times \omega_1^c \frac{M}{D}} \right| = 1,0$$

- Considerando ainda que:

$$\left| \frac{1 - j\omega_1^c T_w}{1 + j\omega_1^c \frac{T_w}{2}} \right| \approx 1,0$$

- temos

$$r \approx \frac{1}{\omega_1^c M} = \frac{T_w}{0,4 \times M} \quad \Rightarrow \quad \boxed{r = 2,5 \frac{T_w}{M}}$$

Valores aproximados para o exemplo

- Com $T_w = 2{,}0\ s$:

$$\omega_1^c = \frac{0,4}{2,0} = 0,2\, rad/s$$

$$r = 2,5\, \frac{T_w}{M} = 2,5 \times \frac{2,0}{10} = 0,5$$

Determinação de T_r sem aproximações

- A partir da hipótese sobre o atraso de 15º de $C(j\omega_1^c)$:

$$\angle C(j\omega_1^c) = tg^{-1}(\omega_1^c T_r) - tg^{-1}(\omega_1^c \frac{r}{R} T_r) = -15^o$$

- Substituindo os valores de ω_1^c e r já calculados:

$$\boxed{T_r = 11{,}03\ s}$$

Determinação de T_r aproximado

- A partir da hipótese sobre o atraso de 15° de $C(j\omega_1^c)$:

$$\angle C(j\omega_1^c) = tg^{-1}(\omega_1^c T_r) - tg^{-1}(\omega_1^c \frac{r}{R} T_r) = -15^o$$

- Fazendo $X = \omega_1^c T_r$:

$$tg^{-1}(X) - tg^{-1}(\frac{r}{R} X) = -15^o$$

- Calculando a tangente de ambos os lados da equação:

$$\frac{X - (r/R)\,X}{1 + (r/R)\,X^2} = -tg\ 15^o = -0,268$$

Determinação de T_r *(cont.)*

- A equação anterior resulta em:

$$X^2 + \frac{1-(r/R)}{0,268\ (r/R)} X + \frac{R}{r} = 0$$

- Resolvendo para o maior valor de X e reconvertendo para ω_1^c:

$$T_r = \frac{1}{\omega_1^c} \times \left[\frac{(r/R)-1}{0,536(r/R)} + \sqrt{\left(\frac{(r/R)-1}{0,536(r/R)}\right)^2 - \frac{R}{r}} \right]$$

- o que fornece:

$$\boxed{T_r = 17{,}8\ s}$$

Resultados do Projeto

Método Exato:

- *FT* do Compensador:

$$C(s) = \frac{1 + 11,03\ s}{1 + 80,3\ s}$$

- Margem de Fase:

$$M_\phi \approx 40^o$$

Método Aproximado:

- *FT* do Compensador:

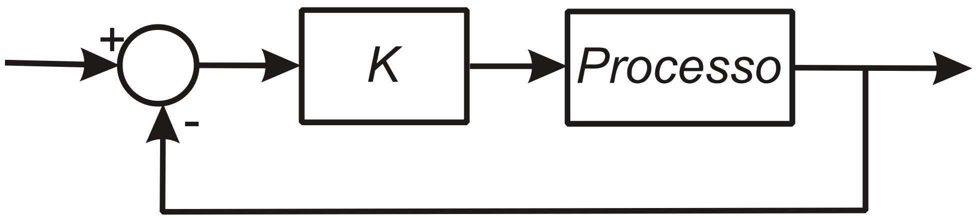
$$C(s) = \frac{1 + 17,8\ s}{1 + 178\ s}$$

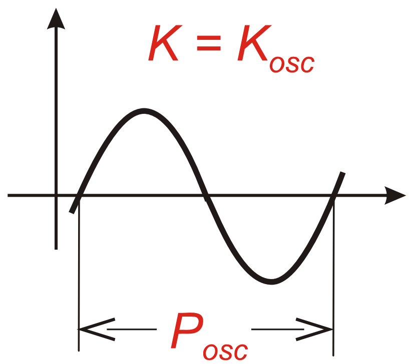
- Margem de Fase:

$$M_\phi \approx 63,6^o$$

Projeto pelo método de Ziegler-Nichols

- Ajustes baseados em valor limite do ganho de um controlador proporcional e do período da oscilação associada:





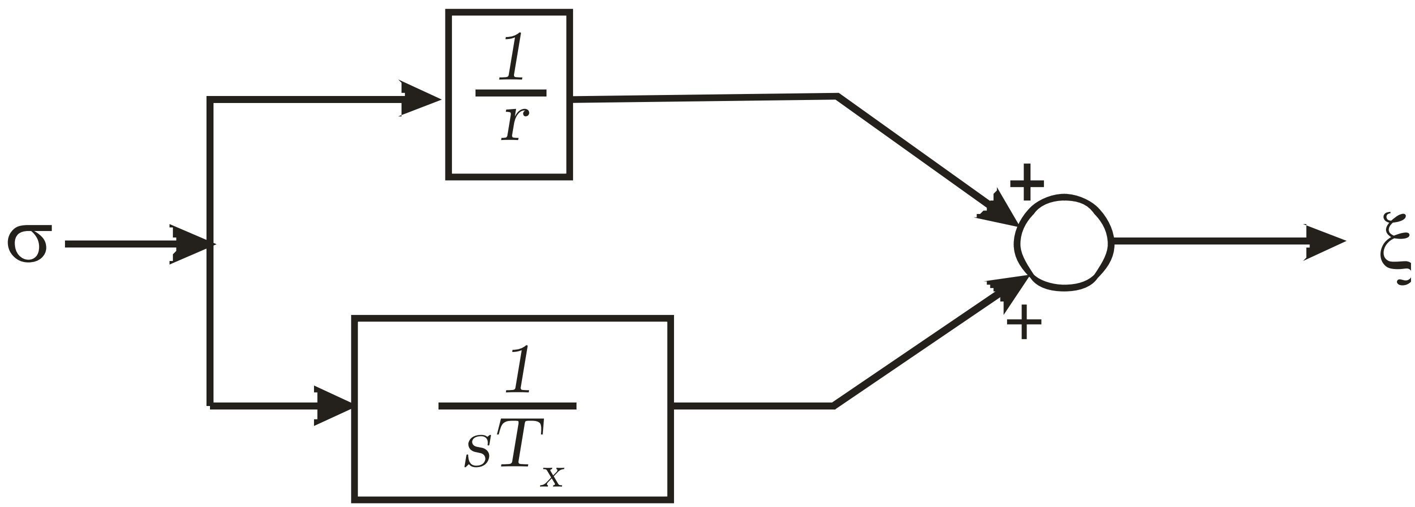
onde $P_{osc} = 2\pi / \omega_{osc}$.

- Valores de K_{osc} e ω_{osc} podem ser obtidos através de métodos de análise, como o critério de Routh-Hurwitz.

Ajustes de Ziegler-Nichols

	Controlador	
	PI	**PID**
Parâmetro	$C(s) = K_c(1 + \frac{1}{T_i\ s})$	$C(s) = K_c(1 + \frac{1}{T_i\ s} + T_d\ s)$
K_c	$0,45\ K_{osc}$	$0,6\ K_{osc}$
T_i	$0,83\ P_{osc}$	$0,5\ P_{osc}$
T_d	**-**	$0,125\ P_{osc}$

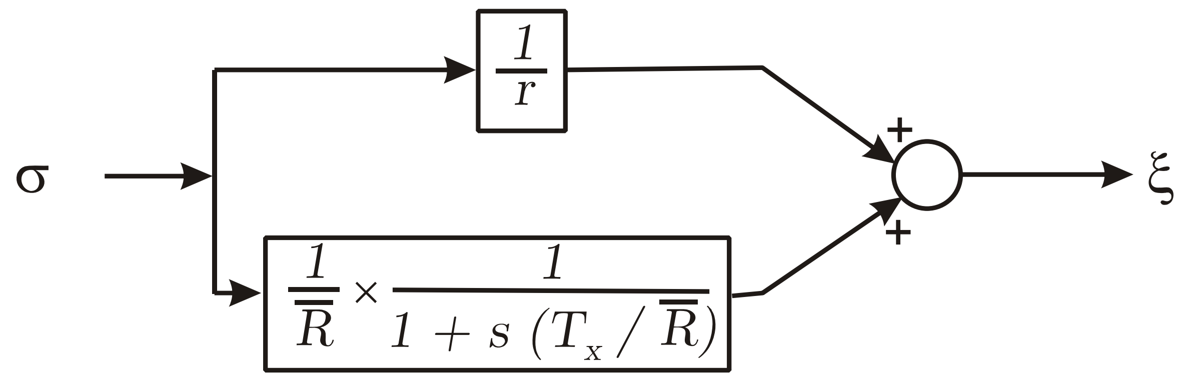
Ajuste para Regulador *PI*



- Como $C(s) = K_c(1 + \frac{1}{T_i\ s})$, os ajustes de *Z-N* são:

$$\boxed{\begin{aligned} r &= 1/K_c \\ T_x &= T_i/K_c \end{aligned}}$$

Ajuste considerando o estatismo - *I*



- É introduzido um "estatismo" $\bar{R}$, tal que a *FT* do regulador torna-se:

$$C(s) = \frac{1}{r} + \frac{1}{\bar{R}} \times \frac{1}{1 + s\left(T_x/\bar{R}\right)} = \frac{r + \bar{R}}{r\bar{R}} \times \frac{1 + s\frac{T_x}{r+\bar{R}}}{1 + s\frac{T_x}{\bar{R}}}$$

Ajuste considerando o estatismo - *II*

- Comparando

$$C(s) = \frac{r+\bar{R}}{r\bar{R}} \times \frac{1+s\frac{T_x}{r+\bar{R}}}{1+s\frac{T_x}{\bar{R}}} \quad \text{com} \quad C_P(s) = \frac{1}{R} \times \frac{1+sT_r}{(1+s\frac{r}{R}T_r)}$$

- Concluímos que $\bar{R} = \dfrac{rR}{r-R}$;

- Usando o ajuste *r = 1 / K_c* do *PI :* $\boxed{\bar{R} = \dfrac{R}{1 - R\,K_c}}$

- O ajuste de T_x permanece o do PI, i. é, $\boxed{T_x = T_i / K_c}$.

Exemplo *Z-N*

- Para um hidrogerador cujos dados são:

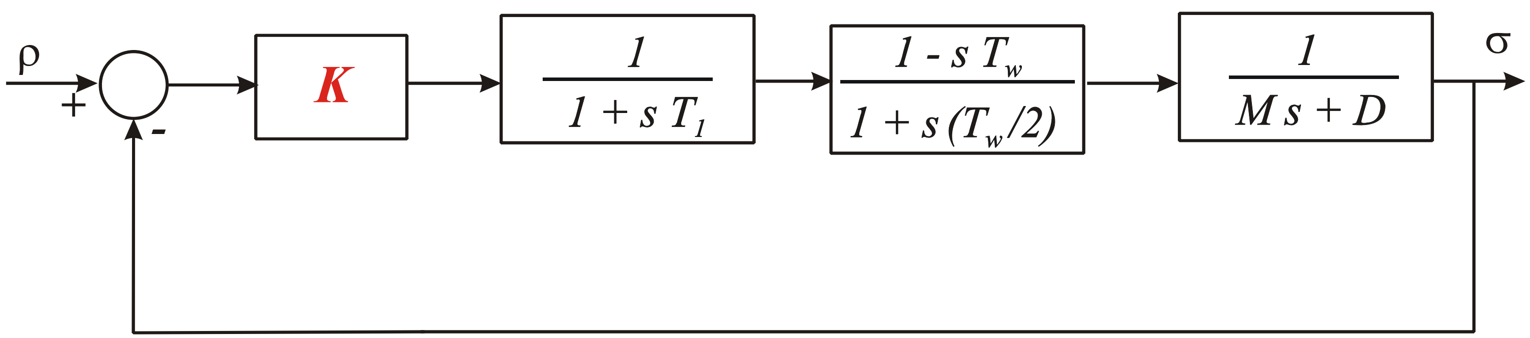
$$T_w = 2{,}0\ s; \quad D = 1{,}0\ s; \quad T_1 = 0{,}5\ s$$

$$M = 10{,}0\ s; \quad R = 0{,}05.$$

projetar um regulador de velocidade usando os critérios de Ziegler-NIchols.

Solução do exemplo de Z-N - *I*

- Define-se o *Processo* como o sistema sujeito apenas a um controlador proporcional, sem o estatismo:



- Do arranjo de Routh-Hurwitz, obtém-se

$$\boxed{K_{osc} \; = \; 4,8125}$$

$$P_{osc} \; = \; 0,6124 \; rad/s \; \Rightarrow \; \boxed{P_{osc} = 10,26 \; s}$$

Solução do exemplo de Z-N - *II*

- Ajustes de *Z-N* para controlador *PI:*

$$
\begin{aligned}
K_c &= 0,45\ K_{osc} = 2,1656 \\
T_i &= 8,83\ P_{osc} = 8,516\ s
\end{aligned}
$$

- Considerando estatismo permanente *R = 0,05,* o *estatismo aparente* e o estatismo transitório serão*:*

$$\bar{R} = \frac{R}{1 - RK_c} = \frac{0,05}{1 - 0,05 \times 2,1656} = 0,0561$$

$$r = 1/K_c = 1/2,1656 = 0,462$$

Solução do exemplo de Z-N - *III*

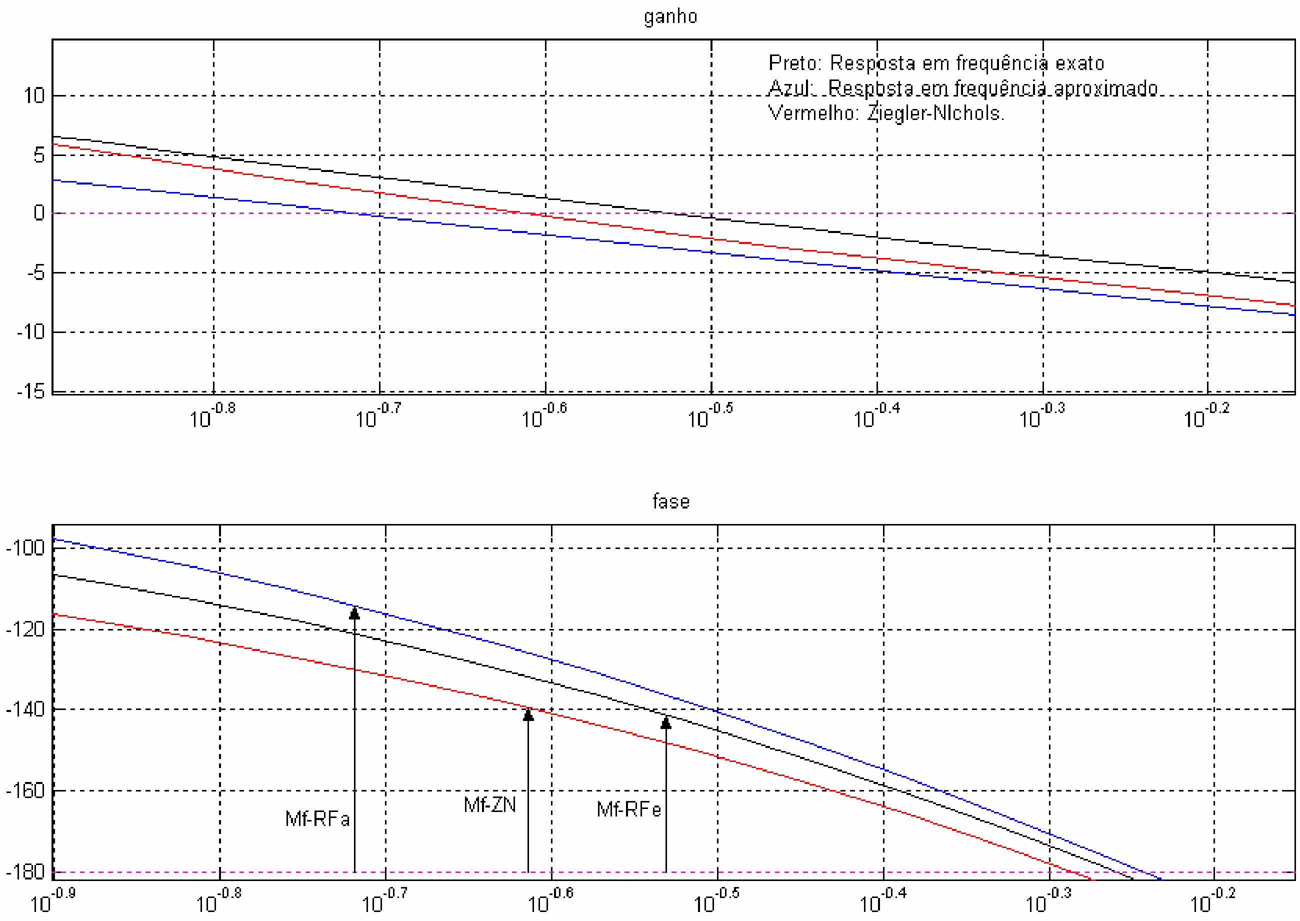
- Considerando que:

$$C(s) = \frac{r+\bar{R}}{r\bar{R}} \times \frac{1 + s\frac{T_x}{r+\bar{R}}}{1 + s\frac{T_x}{\bar{R}}}$$

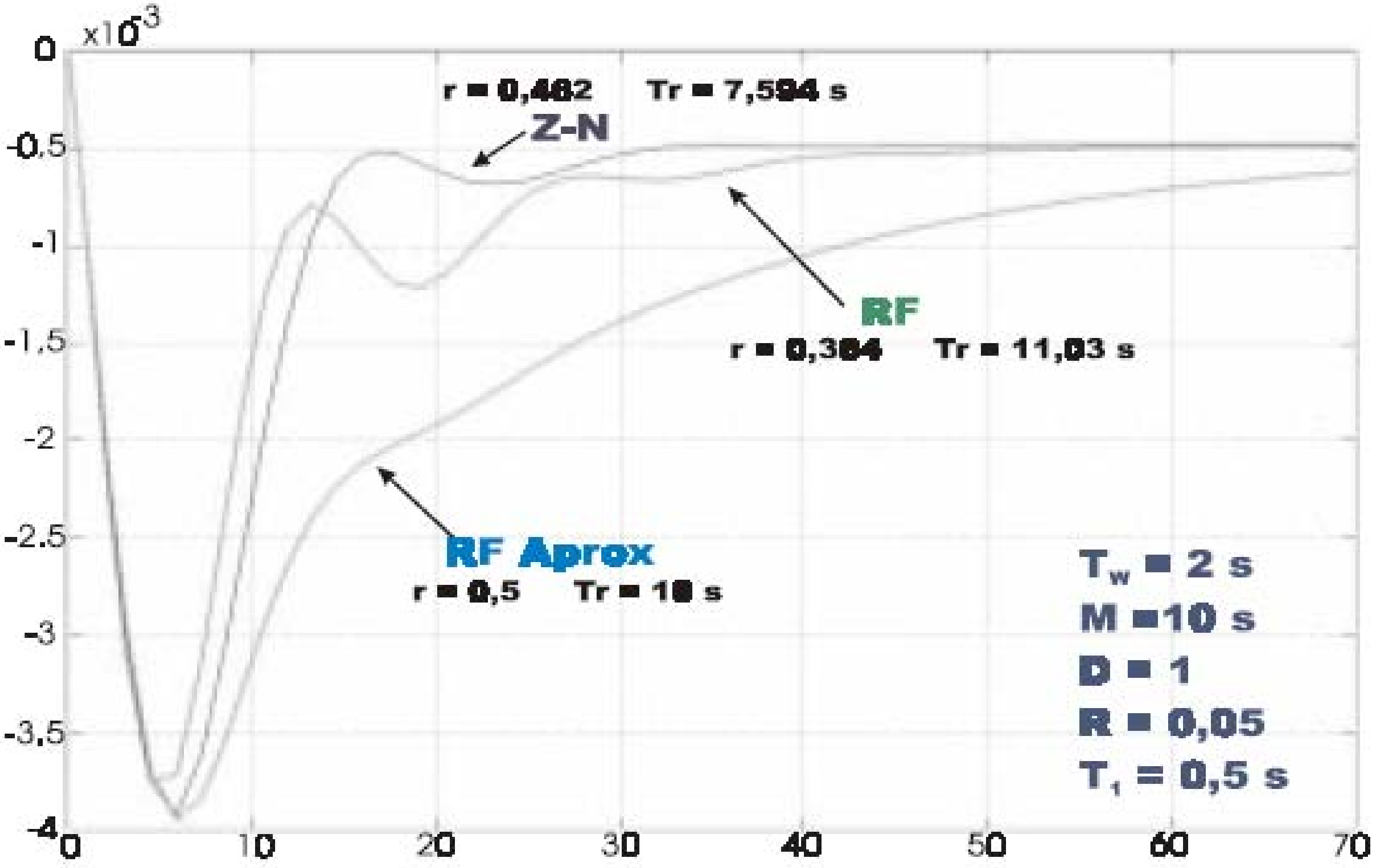
- o controlador será dado por:

$$\boxed{C(s) = \frac{1}{0,05} \times \frac{1 + s\,7,594}{1 + s\,70,132}}$$

Comparação das Respostas em Freqüência dos 3 métodos

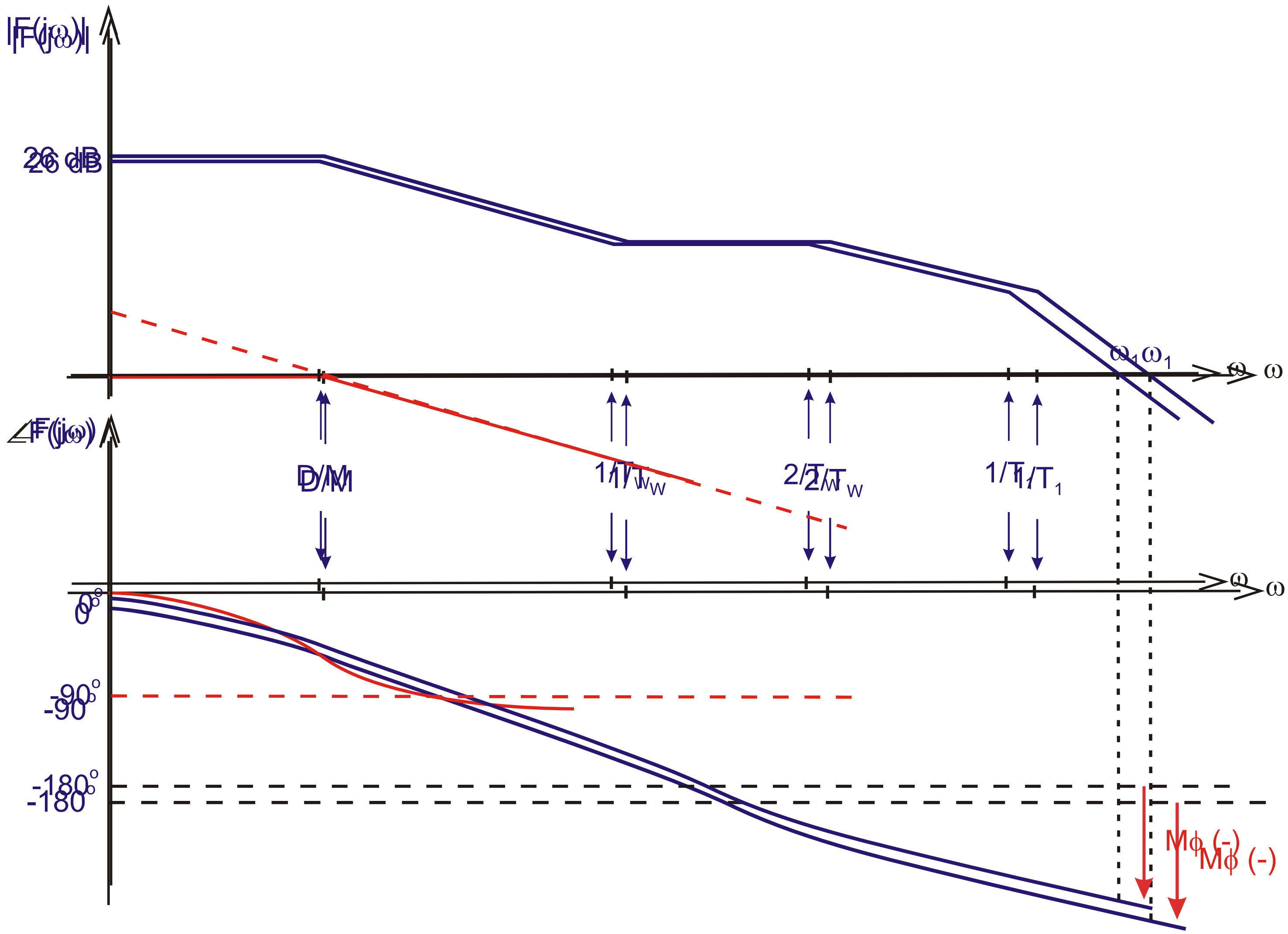


Comparação da Resposta ao Degrau de controladores projetados pelos 3 métodos

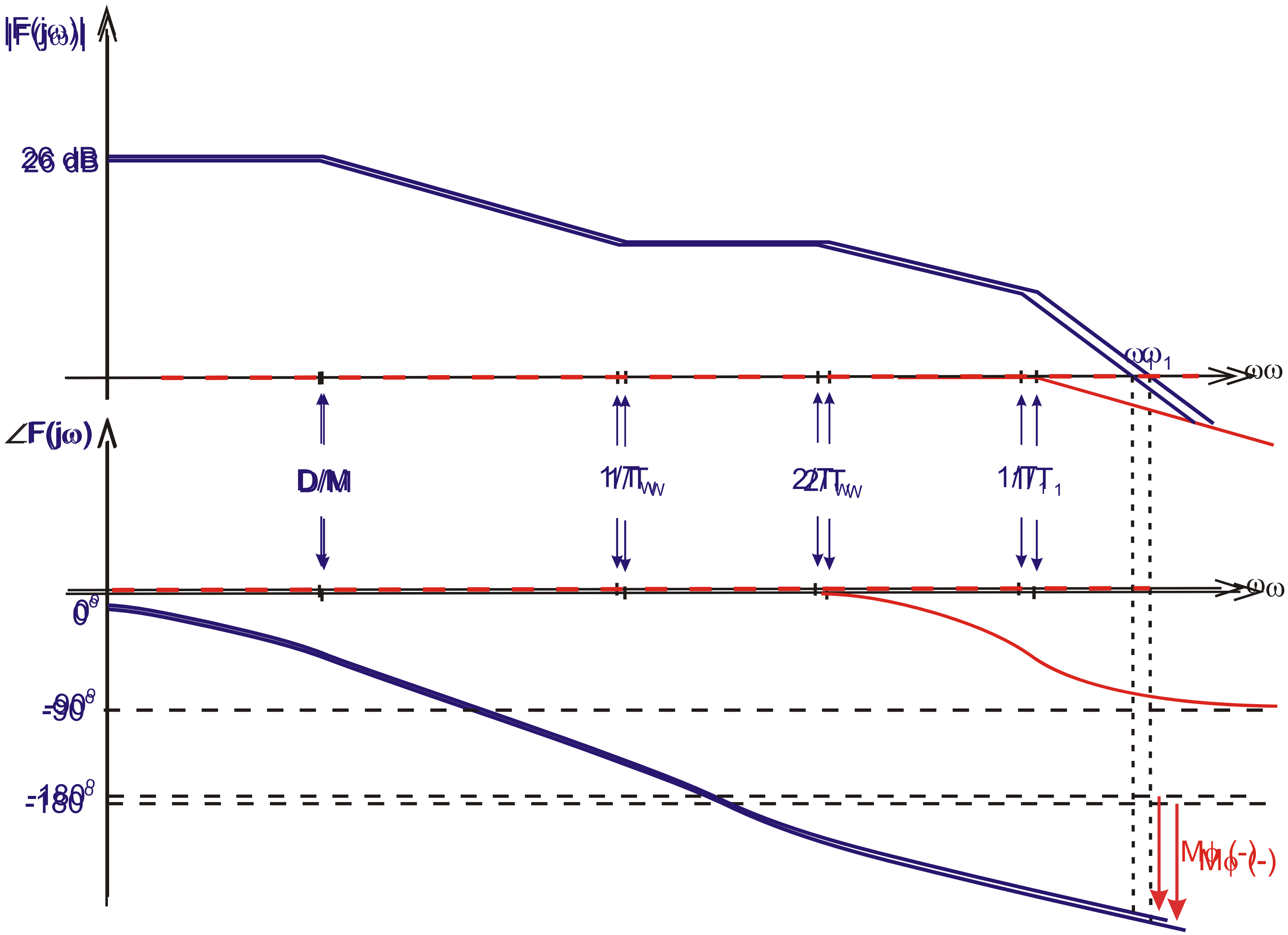


FIM

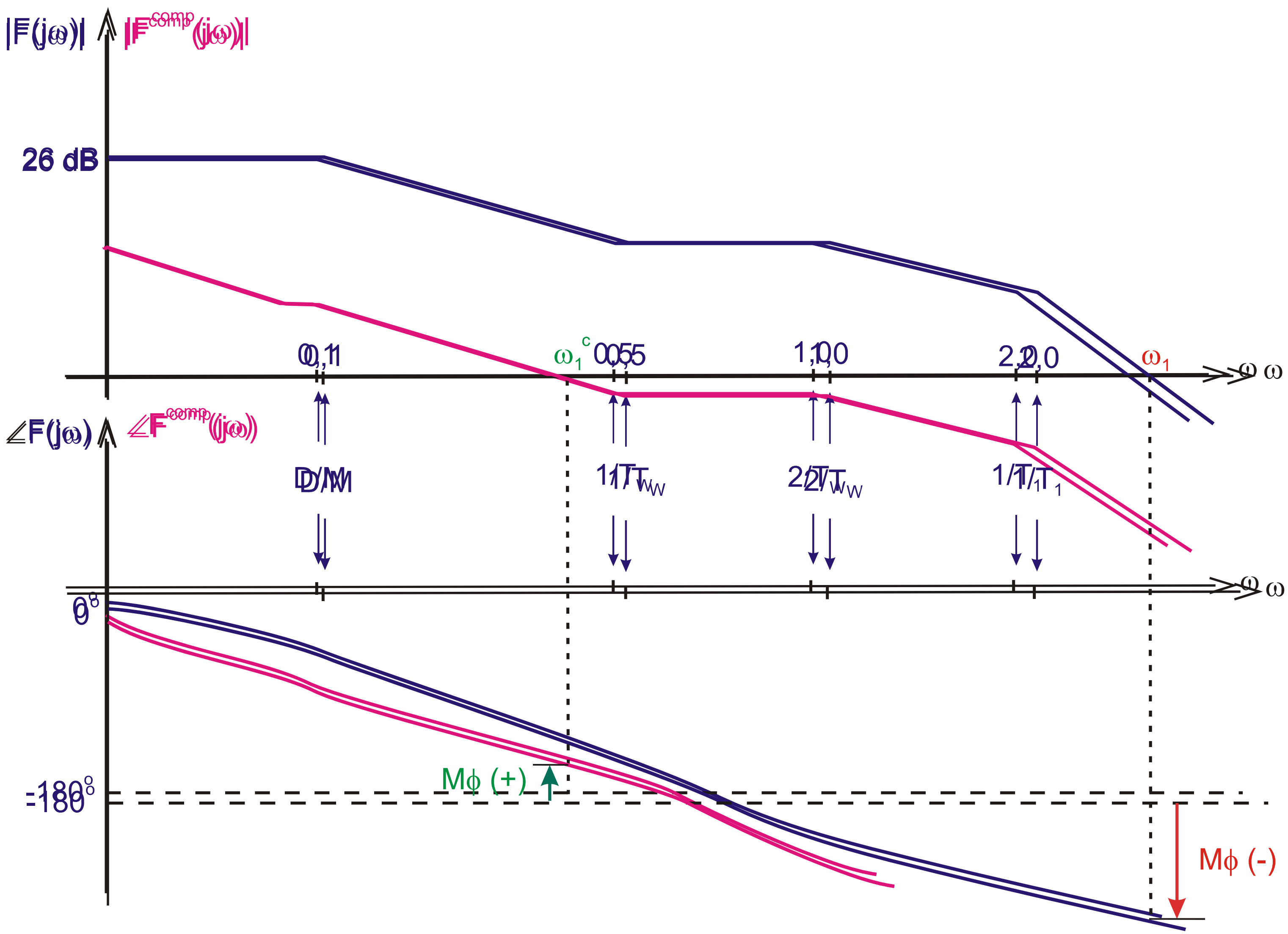
Aproximação D/M:



Aproximação T_1 :



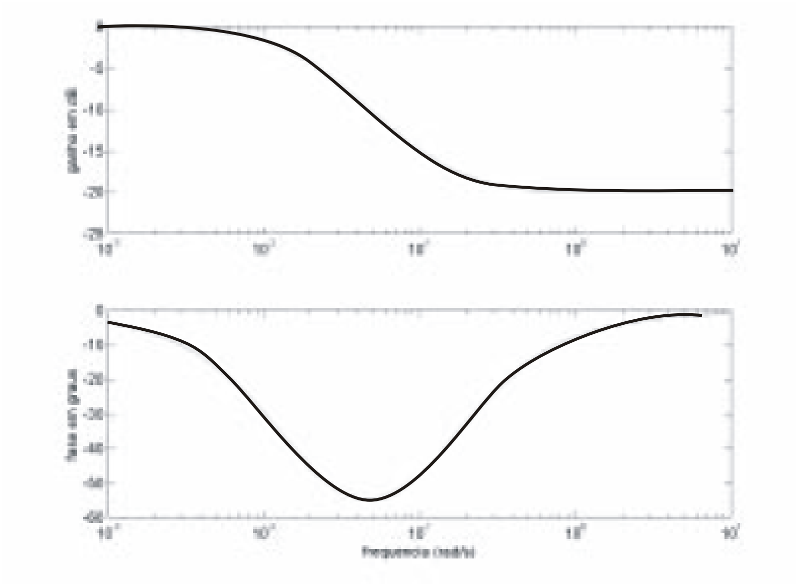
Diagramas de Bode do Sistema Compensado



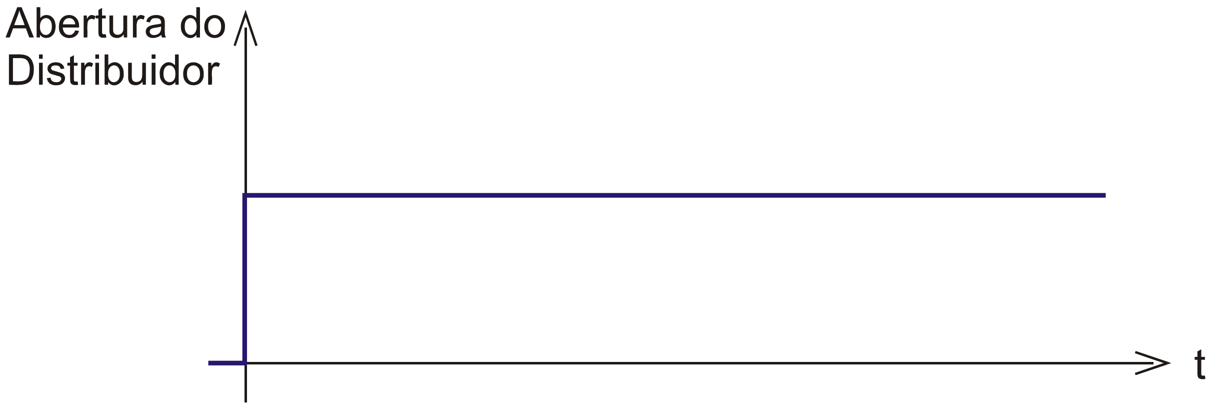
Compensador de Atraso de Fase

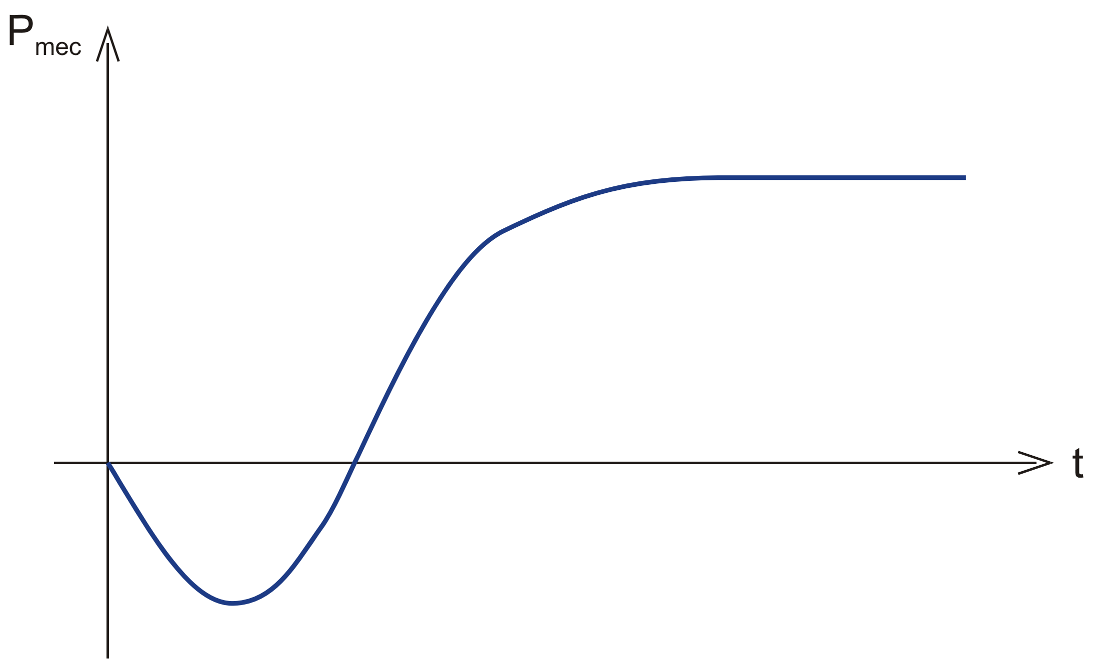
- Função de transferência: $$G_c(s) = K\frac{1+s\tau}{1+s\alpha\tau}$$

- Resposta em Freqüência:



Resposta Transitória de Turbinas Hidráulicas





Regulador de Velocidade para Turbinas Hidráulicas