

Seção 3.5 Síntese de Parâmetros de Reguladores de Velocidade de Turbinas Hidráulicas

Métodos de controle clássico são geralmente empregados para o projeto de reguladores de velocidade de unidades na condição de operação isolada. Duas abordagens são usadas a seguir com este objetivo:

- projeto no domínio da frequência usando diagramas de Bode;
- projeto usando o método de Ziegler-Nichols.

3.5.2 Compensação usando compensador de atraso de fase

A função de transferência de um compensador de atraso de fase é dada por:

$$G_c(s) = K \frac{1 + s\tau}{1 + s\alpha\tau}$$

com $\alpha > 1$. A resposta em frequência do compensador é mostrada na Figura 51.

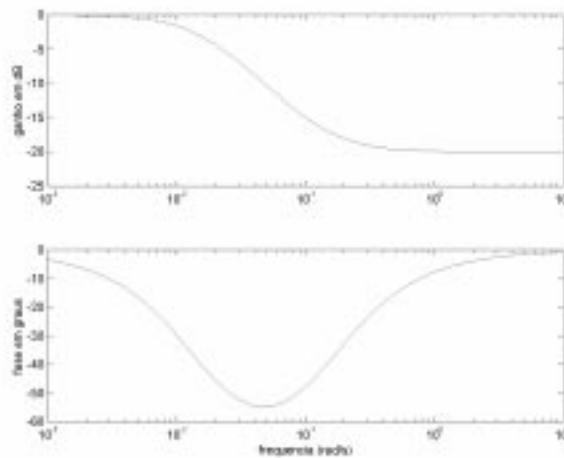


Figura 51: Resposta em frequência do compensador de atraso de fase

A compensação usando o compensador de atraso de fase é feita colocando o compensador em cascata com o processo (Fig. 52).

Suponhamos que o sistema não-compensado tenha a resposta em frequência mostrada na figura 53, e que sua margem de fase seja insuficiente.

Na compensação usando o compensador de atraso de fase, tenta-se reduzir a frequência de corte de ganho do sistema não-compensado, utilizando-se a atenuação de $G_c(s)$ a altas frequências, de modo que a nova frequência de corte de ganho w_1^c propicie a margem de fase desejada.

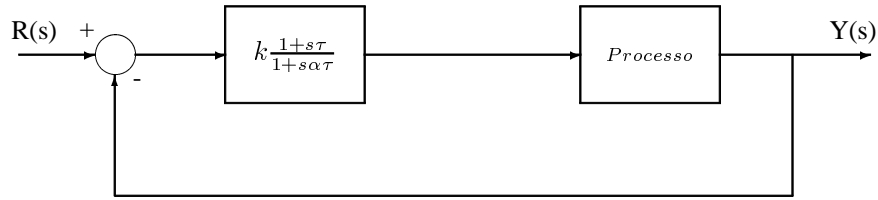


Figura 52: Compensador de atraso de fase e processo

O procedimento para o projeto pode ser resumido nos seguintes passos:

1. Traçar os diagramas de Bode do sistema não-compensado, e determinar a sua margem de fase. Se esta não atender às especificações, prosseguir com o passo 2.
2. Determinar a frequência em que se obteria a margem de fase desejada se a curva de amplitude cortasse o eixo de 0 dB nesta frequência (deixar uma folga de 5° a 15° para levar em conta o atraso provocado pelo compensador).
3. Calcular a atenuação necessária à frequência ω_c para assegurar que a curva de amplitude cruza 0 dB a esta frequência.
4. Determinar a posição do zero do compensador de acordo com o atraso permissível para $G_c(j\omega)$, para assegurar que a curva de amplitude cruza 0 dB a esta frequência.
5. Calcular α a partir da atenuação calculada no passo 4.
6. Calcular o polo como $\omega_p = \frac{\omega_z}{\alpha}$, onde ω_z é a frequência correspondente ao zero.

3.5.3 Procedimento para ajuste aproximado dos parâmetros de reguladores de velocidade para hidrogeradores

A parte ajustável da função de transferência em malha fechada do sistema de controle primário de velocidade de um hidrogerador é dada por:

$$F_{aj}(s) = \frac{1}{R} \frac{1 + sT_r}{1 + s \frac{r}{R} T_r}$$

A derivação a seguir permite o cálculo aproximado de T_r e r .

Em regime permanente ($s \approx 0$) tem-se:

$$F_{aj} = \frac{1}{R}$$

Como para altas frequências $w \frac{r}{R} T_r \gg 1$, ou $w \gg \frac{R}{r} T_r$, tem-se um ganho

$$\frac{1}{R} \frac{sT_r}{s \frac{r}{R} T_r} = \frac{1}{r}$$

ou $\frac{R}{r}$ vezes o ganho $\frac{1}{R}$ na frequência zero. Também nas altas frequências o ângulo de fase se

Seção 3.5 Síntese de Parâmetros de Reguladores de Velocidade de Turbinas Hidráulicas

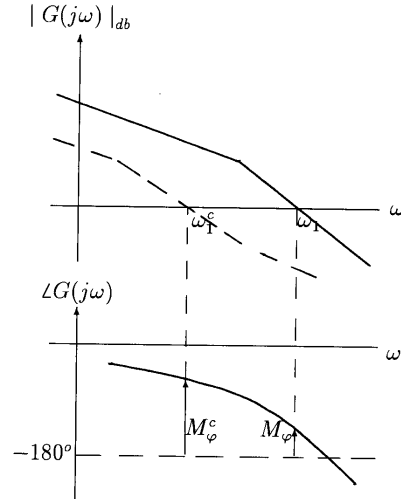


Figura 53: Compensação por atraso de fase.

aproxima de zero.

Portanto, para altas frequências pode-se considerar:

$$F_{aj}(s) \simeq \frac{1}{r}$$

Este é o motivo pelo qual r é chamado *estatismo transitório*. Como $r > R$ (compensador de atraso de fase), o ganho nas frequências mais altas é menor que o ganho em regime permanente.

Normalmente R é fixado em um valor compatível com a operação do sistema interligado ($R = 4\%$ ou 5%). Portanto os parâmetros a ajustar são r e T_r .

Para assegurar uma boa resposta e estabilidade, projeta-se uma margem de fase do sistema compensado de cerca de 40° . Considerando um atraso de cerca 15° introduzido pela função $(1 + T_r s)/(1 + \frac{r}{R} T_r s)$, a função compensada

$$\frac{(1 - T_w s)}{r(1 + sT_1)(1 + s\frac{T_w}{2})(1 + s\frac{M}{D})D}$$

deve ter um ângulo de fase de -125° (já que $-125^\circ - 40^\circ - 15^\circ = -180^\circ$).

Deve-se observar que a função ajustável $F_{aj}(s)$ foi aproximada por seu ganho a altas frequências, $(\frac{1}{r})$.

Considerando-se a parcela $\frac{1}{1 + s\frac{M}{D}}$ tem-se que a relação $\frac{M}{D}$ é pequena, ou seja, a frequência de corte $\frac{D}{M}$ é bem menor do que ω_1^c . Portanto o ângulo em ω_1^c é

Capítulo 3 Controle Primário de Velocidade

$$\theta(\omega_1^c) = -\tan^{-1}\left(\frac{w_1^c M}{D}\right) = -\tan^{-1}\left(\frac{w_1^c}{D/M}\right)$$

e $\frac{D}{M} < w_1^c$. Então $\theta(w_1^c) \approx -90^\circ$.

Portanto os termos restantes devem contribuir com -35° . Uma aproximação adicional é feita desprezando-se a contribuição de fase do termo que depende de T_1 . Isto equivale a considerar que a frequência de corte $\frac{1}{T_1}$ é tal que $\frac{1}{T_1} \gg w_1^c$, ou seja a contribuição em fase de $\frac{1}{1+sT_1}$ em w_1^c é 0° .

Então a fase de

$$\frac{1 - T_w s}{1 + s \frac{T_w}{2}}$$

deve ser -35° . Então:

$$-\tan^{-1}(T_w \omega_1^c) - \tan^{-1}\left(\frac{T_w}{2} \omega_1^c\right) = -35^\circ$$

ou

$$\tan^{-1}(T_w \omega_1^c) + \tan^{-1}\left(\frac{T_w}{2} \omega_1^c\right) = 35^\circ$$

Fazendo $\tan \theta \approx \theta$ tem-se:

$$T_w \omega_1^c + \frac{T_w}{2} \omega_1^c = 35 \times \frac{\pi}{180^\circ}$$

ou

$$\omega_1^c = \frac{0.4}{T_w}$$

Esta frequência deve corresponder à passagem por 0 dB , ou seja

$$|F^c(jw_1^c)| = 1$$

A função de transferência com o compensador aproximado por um ganho $\frac{1}{r}$ tem a forma já vista:

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

Usando o fato de que $T_1 w_1^c \ll 1$ tem-se que:

$$\left| \frac{1}{1 + jw_1^c T_1} \right| \simeq 1.0$$

e a condição fica:

Seção 3.5 Síntese de Parâmetros de Reguladores de Velocidade de Turbinas Hidráulicas

$$\left| \frac{1}{rD} \frac{(1 - j0.4)}{(1 + j\frac{0.4M}{T_w D})(1 + j0.2)} \right| = 1$$

Ou aproximadamente:

$$\left| \frac{1}{rD} \frac{1 - j0.4}{j\frac{0.4M}{T_w D}(1 + j0.2)} \right| = 1$$

onde foi suposto que:

$$\left| 1 + jw_1^c \frac{M}{D} \right| \approx w_1^c \frac{M}{D}$$

já que $w_1^c \frac{M}{D} \gg 1$. Adicionalmente, supondo que:

$$\frac{|1 - jw_1^c T_w|}{|1 + jw_1^c \frac{T_w}{2}|} \approx 1.0$$

tem-se:

$$\left| \frac{1}{rD} \frac{1}{j\frac{0.4M}{T_w D}} \right| = 1$$

Então $\frac{T_w}{0.4Mr} = 1$ e

$$r = 2.5 \frac{T_w}{M}$$

Determinação de T_r :

A função de transferência

$$\frac{1 + sT_r}{1 + s\frac{r}{R}T_r} \quad (3.148)$$

deve ter um ângulo de fase de -15^0 na frequência de corte de ganho $w_1^c = \frac{0.4}{T_w}$. Então

$$\tan^{-1} \frac{0.4T_r}{T_w} - \tan^{-1} \frac{0.4rT_r}{T_w R} = -15^0$$

Usando-se

$$\tan(\alpha - \beta) = \frac{\tan \alpha - \tan \beta}{1 + \tan \alpha \tan \beta}$$

com

$$\tan(-15^0) = -\tan 15^0 = -0.268$$

e fazendo-se $X = \frac{0.4T_r}{T_w}$, tem-se:

$$\frac{X - \frac{r}{R}X}{1 + X^2 \frac{r}{R}} = -0.268 \quad (3.149)$$

ou

$$X^2 + \frac{(1 - \frac{r}{R})}{0.268 \frac{r}{R}} + \frac{R}{r} = 0$$

A solução é:

$$X = \frac{-\frac{1 - \frac{r}{R}}{0.268 \frac{r}{R}} \pm \sqrt{\left(\frac{1 - \frac{r}{R}}{0.268 \frac{r}{R}}\right)^2 - 4 \frac{R}{r}}}{2}$$

Como $X = \frac{0.4T_r}{T_w}$, segue que:

$$T_r = \left[\frac{\frac{r}{R} - 1}{0.536 \frac{r}{R}} + \sqrt{\left(\frac{1 - \frac{r}{R}}{0.536 \frac{r}{R}}\right)^2 - \frac{R}{r}} \right] \frac{T_w}{0.4}$$

A raiz com sinal positivo é escolhida porque um maior valor de T_r assegura a relação $T_r \frac{0.4}{T_w} \gg 1$ fazendo com que $\frac{1+sT_r}{R(1+s\frac{r}{R}T_r)}$ tenha um ganho de cerca de $\frac{1}{r}$ na frequência ω_1^c .

3.5.3.1 Ajuste de parâmetros de compensadores pelo método de Ziegler-Nichols Os ajustes propostos por Ziegler e Nichols são expressos em termos do valor do ganho K_{osc} de um controlador proporcional (Fig. 54) que leva o sistema ao limite da estabilidade e do período da oscilação sustentada que ocorreria neste limite, dado por $P_{osc} = \frac{2\pi}{\omega_{osc}}$.

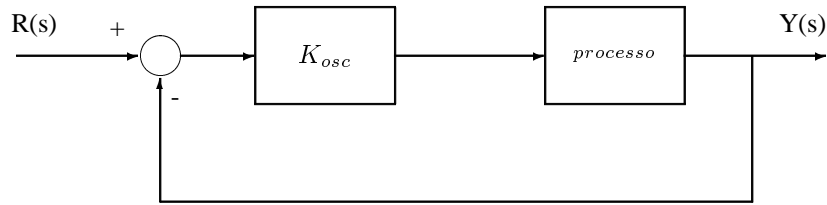


Figura 54: Ajuste de Ziegler-Nichols

O método de Ziegler-Nichols permite a determinação dos parâmetros do compensador de uma maneira simples. Os seguintes ajustes são propostos para o controlador $G_c(s)$:

Proporcional (P):

$$G_c(s) = K_c, \text{ onde } K_c = 0,5K_{osc}$$

Proporcional-Integral (PI):

$$G_c(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{T_I s}\right), \text{ onde}$$

Seção 3.5 Síntese de Parâmetros de Reguladores de Velocidade de Turbinas Hidráulicas

$$K_c = 0,45K_{osc}$$

$$T_i = 0,83P_{osc}$$

Proporcional-Integral-Derivativo (PID)

$$G_c(s) = K_c(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s), \text{ onde}$$

$$K_c = 0,6K_{osc}$$

$$T_i = 0,5P_{osc}$$

$$T_d = 0,125P_{osc}$$

Proporcional-Derivativo (PD)

$$G_c(s) = K_c(1 + T_d s), \text{ onde}$$

$$K_c = 0,6K_{osc}$$

$$T_d = 0,125P_{osc}$$

O método de Ziegler-Nichols é usado a seguir para a determinação dos parâmetros de controladores para reguladores de velocidade com configuração moderna.

O sistema de controle de velocidade de uma unidade hidráulica mostrado no diagrama de blocos da Fig. 55 tem função de transferência

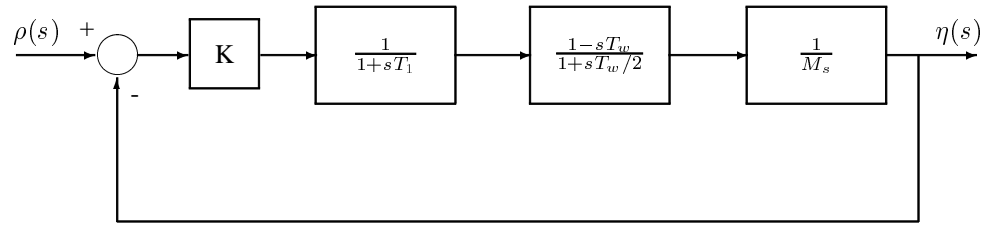


Figura 55: Sistema usado para calcular ganho

$$\frac{\sigma(s)}{\rho(s)} = \frac{K(1 - sT_w)}{\frac{MT_1 T_w}{2} s^3 + s^2(T_1 + \frac{T_w}{2})M + s(M - KT_w) + K}$$

O controlador foi substituído por um ganho K e T_1 representa a constante de tempo do servoposicionador.

A equação característica é dada por:

$$s^3(\frac{MT_1 T_w}{2}) + s^2 M(T_1 + \frac{T_w}{2}) + s(M - KT_w) + K = 0$$

Deve-se determinar o ganho K_{osc} que leva o sistema ao limiar da instabilidade. Usando Routh-Hurwitz:

Capítulo 3 Controle Primário de Velocidade

$$\begin{array}{l} s^3 \\ s^2 \\ s^1 \\ s^0 \end{array} \left| \begin{array}{ll} \frac{MT_1T_w}{2} & M - KT_w \\ M(T_1 + \frac{T_w}{2}) & K \\ \frac{M(T_1 + \frac{T_w}{2})(M - KT_w) - K(MT_1T_w)/2}{M(T_1 + \frac{T_w}{2})} & 0 \\ K & \end{array} \right.$$

A condição para a existência de raízes sobre o eixo imaginário é:

$$(T_1 + \frac{T_w}{2})(M - K_{osc}T_w) - K_{osc}\frac{T_1T_w}{2} = 0$$

e, portanto

$$K_{osc} = \frac{2T_1 + T_w}{3T_1 + T_w} \frac{M}{T_w}$$

A frequência de oscilação pode ser calculada da equação auxiliar:

$$M(T_1 + \frac{T_w}{2})s^2 + K_{osc} = 0$$

Logo:

$$s = \pm j \sqrt{\frac{2}{T_w(3T_1 + T_w)}}$$

Portanto a frequência é dada por:

$$\omega_{osc} = \sqrt{\frac{2}{T_w(3T_1 + T_w)}}$$

e o período pode ser calculado de

$$P_{osc} = \frac{2\pi}{\omega_{osc}}$$

ou seja,

$$P_{osc} = \pi \sqrt{2T_w(3T_1 + T_w)}$$

Exemplo:

Seja o sistema com parâmetros:

$$R = 0.05$$

$$M = 10.0 \text{ seg}$$

$$T_w = 2.0 \text{ seg}$$

$$T_1 = 0.5 \text{ seg}$$

Então usando as expressões anteriores, tem-se $K_{osc} = 4.286$ e $P_{osc} = 11.755 \text{ seg}$.

Supondo inicialmente que o controlador seja *PI*. Então

Seção 3.5 Síntese de Parâmetros de Reguladores de Velocidade de Turbinas Hidráulicas

$$G_c(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{sT_i}\right)$$

onde $K_c = 0.45K_{osc}$ e $T_i = 0.83P_{osc}$.

Os parâmetros do controlador são $K_c = 1.9287$ e $T_i = 9.757$ seg.

A estrutura do regulador com servoposicionador considerando-se apenas a ação PI ($b'_p = 0$) é (ver Eq.(2.96):

$$\frac{1}{bt} + \frac{1}{sT_x}$$

Então,

$$G_c(s) = K_c + \frac{K_c}{sT_i} = \frac{1}{b_t} + \frac{1}{sT_x}$$

Com os parâmetros calculados, tem-se:

$$b_t = \frac{1}{K_c} \Rightarrow b_t = 0.5185$$

$$r = b_t \Rightarrow r = 0.5185$$

$$T_x = \frac{T_i}{K_c} \Rightarrow T_x = 5.06 \text{ seg}$$

Usando-se a função de transferência do regulador, tem-se:

$$\frac{b'_p + b_t}{b_t b'_p} \times \frac{1 + s \frac{T_x}{b'_p + b_t}}{1 + s \frac{T_x}{b'_p}} = \frac{1}{R} \times \frac{1 + s T_r}{1 + s \frac{r}{R} T_r}$$

e $T_r = \frac{T_x}{b'_p + b_t}$, $R = \frac{b'_p b_t}{b'_p + b_t}$ e $r = b_t$, de tal modo que os dois lados da equação são equivalentes.

Pode-se calcular b'_p usando a equação

$$R = \frac{b'_p b_t}{b'_p + b_t}$$

Então:

$$b'_p = \frac{b_t R}{b_t - R}$$

ou, com $R = 0.05$, $b'_p = 0.055$.

T_r pode ser calculado usando-se a equação:

$$T_r = \frac{T_x}{b'_p + b_t}$$

e $T_r = 8.82 \text{ seg.}$

O projeto de um controlador de atrase de fase por diagramas de Bode, usando as aproximações desenvolvidas anteriormente, leva a $r = 0.5$ e $T_r = 15.20 \text{ seg.}$

(Subsubsection head:)Controlador *PID*

Este controlador é dado por

$$G_c(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

onde $K_c = 0.6K_{osc}$, $T_i = 0.5P_{osc}$ e $T_d = 0.125P_{osc}$

Substituindo-se os parâmetros obtem-se

$$K_c = 2.57$$

$$T_i = 5.88 \text{ seg}$$

$$T_d = 1.47 \text{ seg}$$

Comparando com a estrutura do regulador de velocidade *PID*:

$$G_c(s) = K_c + \frac{K_c}{T_i s} + K_c T_d s = \frac{1}{b_t} + \frac{1}{s T_x} + s T_n$$

Usando as fórmulas de Ziegler-Nichols, tem-se:

$$\begin{aligned} b_t &= 0.389 \\ b'_p &= 0.0574 \\ T_x &= 2.288 \\ T_n &= 3.778 \end{aligned}$$

3.6 Exercícios

1. O diagrama de blocos da Fig. 56 corresponde a um regulador de velocidade utilizado em unidades hidráulicas.
 - a) Ache a função de transferência $N(s)/\sigma(s)$;
 - b) Determine os estatismos permanente e transitório, R e γ , supondo T_c desprezível. Calcule seus valores numéricos para $T_a = 1,86 \text{ s}$, $T_i = 3,05 \text{ s}$, $G_f = 5,0$, $H_p = 0,25$, $t = 1$.
 - c) Se o regulador controla a velocidade de um gerador isolado de potência nominal 100 MW e frequência nominal 60 Hz, o qual alimenta uma carga de 60 MW, calcule o desvio de frequência resultante da aplicação de um degrau de carga de 3,0 MW. Suponha que 1% de variação de frequência implica em 1% de variação da carga.

Seção 3.6 Exercícios

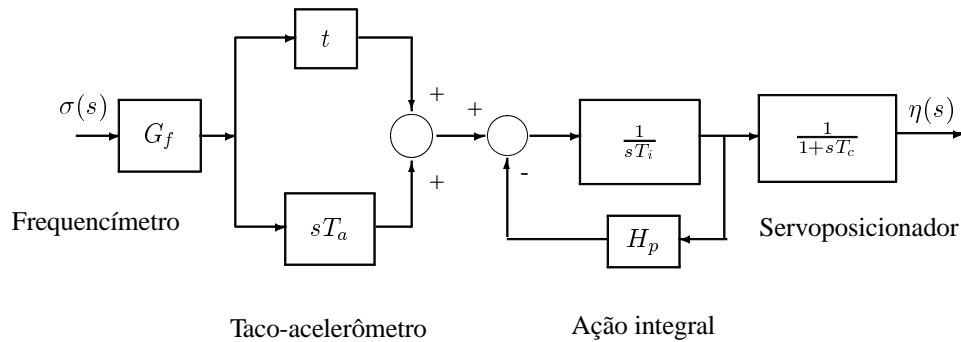


Figura 56: Diagrama de blocos para regulador do Exercício 1.

2. Dois sistemas *A* e *B* têm as seguintes características:
 Sistema A: Capacidade Nominal = 300 MW, $R = 8\%$, $D = 2\%$ para cada 1% de variação de frequência;
 Sistema B: Capacidade Nominal = 900 MW, $R = 8\%$, $D = 2\%$ para cada 1% de variação de frequência.
 - a) Supor que os sistemas operam isoladamente. Se o sistema *A* alimenta sua carga nominal de 200 MW, calcule a queda de frequência em regime permanente na área *A* após um degrau de carga de 5 MW;
 - b) Repetir (a), mas agora supondo áreas interligadas e que a área *B* está alimentando sua carga nominal de 800 MW. Calcule ainda os acréscimos de geração em cada área para suprir o degrau de carga na área *A*.
3. Considere o caso de uma área ligada a um sistema infinito, sem controle primário de velocidade. Denote por M a constante de inércia da área, D o coeficiente de amortecimento da carga da área e T o coeficiente de potência de sincronização entre a área e o sistema infinito. Através de uma análise para pequenas perturbações (modelo linearizado), calcule a resposta no tempo do desvio de frequência que segue uma variação em degrau de amplitude ΔL na carga. Calcule a razão de amortecimento, a frequência natural não-amortecida e comente a cerca do desvio de frequência em regime permanente.
4. Considere a malha de regulação de velocidade de um gerador isolado, sendo o regulador do tipo com queda de velocidade e $T_R = 0,08$ s, turbina a vapor sem reaquecimento com ganho unitário e $T_c = 0,5$ s, constante de inércia do conjunto turbina-gerador, H , igual a 5,0 s. Além disso, considere que a carga varia com a frequência de acordo com a relação $2,0$ pu MW/1,0 pu rad/s. Calcule o mínimo valor do estatismo R para que o sistema de controle em malha fechada ainda permaneça estável.
5. Considere o sistema de controle de velocidade de um gerador hidráulico, cujos parâmetros são dados abaixo:
 - T_1 (constante de tempo do servomotor) = 0,2 s
 - T_w (constante de tempo de partida da água) = 4,0 s

Capítulo 3 Controle Primário de Velocidade

- M (inércia da unidade) = 10,0 s
- D (variação da carga com velocidade) = 1,0 pu/pu
- R (estatismo permanente) = 0,05 pu/pu

Projete um regulador de velocidade para a unidade hidráulica de modo que a margem de fase do sistema compensado seja de aproximadamente 40° , admitindo-se um atraso de fase de 15° para a parte ajustável do regulador na nova frequência de cruzamento de ganho. Para executar o projeto, utilize:

- A abordagem aproximada sugerida na Subseção 3.5;
- Um procedimento similar ao da Subseção 3.5, mas sem a introdução de aproximações.

Compare os resultados dos dois projetos e discuta possíveis discrepâncias.