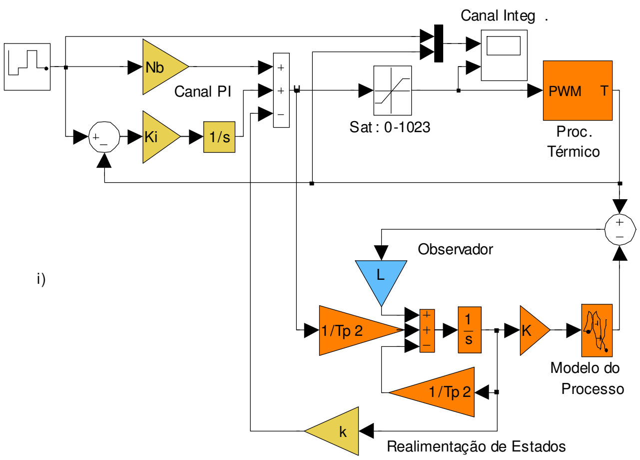
Departamento de Engenharia Elétrica
Faculdade de Tecnologia
Universidade de Brasília
ENE/FT/UnB

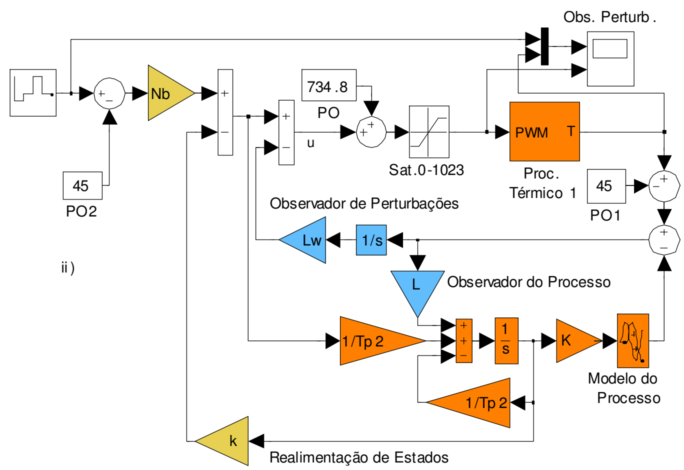
Prof. Adolfo Bauchspiess
http://www.ene.unb.br/adolfo/CDig
164887 CONTROLE DIGITAL - 2°/2008
Terça-Feira, 18 de novembro de 2008, 7^{30} - 10^{00}

Nome:____Matrícula:________________

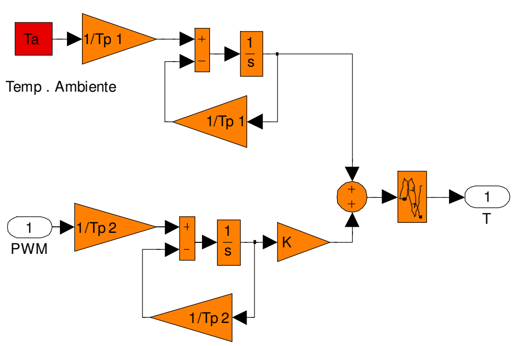
3ª PROVA

1ª Questão: (4 pts): Existem duas formas usuais de se incluir uma ação integral em um controlador no espaço-de-estados: i) via canal integral e ii) via observador de perturbações. Estes dois métodos estão ilustrados a seguir para o processo térmico utilizado no experimento 3 de CDig.





O processo térmico, conforme obtido no experimento 2 de CDig, tem o seguinte modelo:



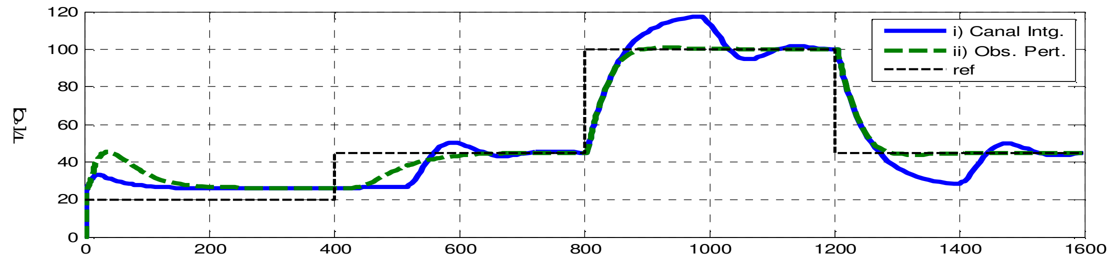

```
Parâmetros identificados

K=0.09078613274052;
Tp1=352.9649296152092;
Tp2=48.86312641418012;
Tz=249.2256137163764;
Td=4.66250225154633;
```

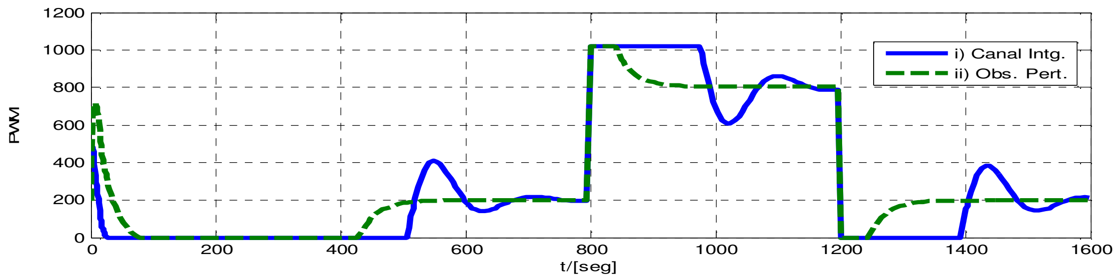
```
Parâmetros projetados

k=0.9545;
L=1.0964;
Nb=21.5289;
Lw=1;
Ki=1;
```

Considerando a simulação destes controladores, conforme as figuras a seguir:

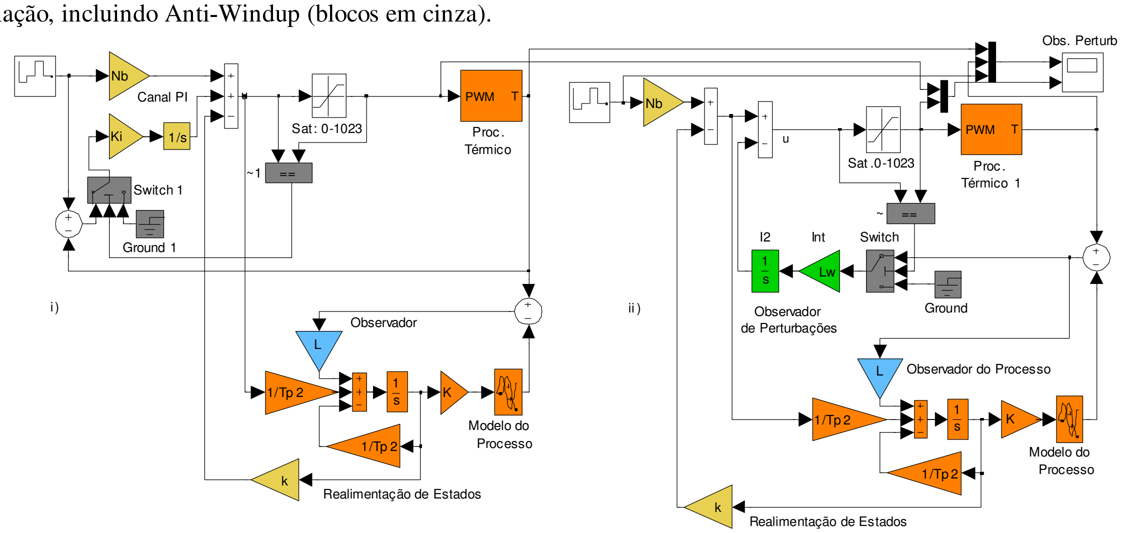
a) (0,5) Por que não é possível seguir a referência 20°C (0 a 400s)?
b) (1,0) Por que é necessário calcular e utilizar Pontos de Operação (POs) no projeto ii?
c) (1,0) É possível com a estrutura ii obter-se uma resposta sub-amortecida, como no caso i? Por quê?
d) (1,5) Conforme mostrado, ocorre "wind-up" nas duas estruturas. Desenhe um diagrama de blocos (blocos do simulink) "Anti-Windup" para o caso ii.

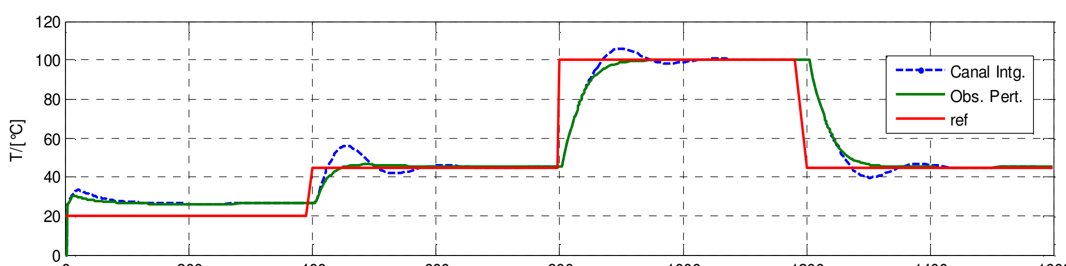
--
a) Temperatura ambiente de 27°C. Processo não permite resfriamento.
b) Não seriam necessários!! A ação integral do observador de perturbações dispensa a inclusão de POs.
c) Não é possível. O canal integral em i) aumenta a ordem e permite um sistema sub-amortecido.
d) Bloco comparador sobre saturação simulada.

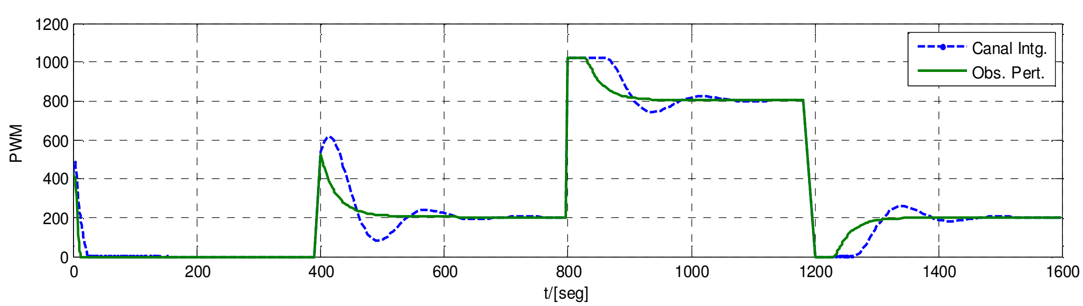




Simulação, incluindo Anti-Windup (blocos em cinza).







2ª Questão: (4 pts) Considere o seguinte sistema discreto

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0{,}8 \end{bmatrix} \mathbf{x}(k) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u \\ y(k) = \begin{bmatrix} 1 & 2 \end{bmatrix} \mathbf{x}(k) \end{cases}$$

a) (1,0) Projete um observador de estados correntes com pólos em $z_{1,2} = 0{,}1$

b) (2,0) Projete um controlador no espaço de estados discreto com canal integral ($K_a = \begin{bmatrix} k_I & k_1 & k_2 \end{bmatrix}$) de tal forma que os autovalores estejam em $z_{1,2} = 0{,}3;\ 0{,}3 \pm 0{,}3i$

c) (0,5) Calcule $\overline{N}$ (canal proporcional do PI) de tal forma que o sistema completo seja de 2ª ordem.

d) (0,5) Apresente o fluxografo do sistema completo (processo, observador e controlador c/ canal integral).

Obs:

Equação de erro de observação predito: $\tilde{\mathbf{x}}(k+1) = [\mathbf{\Phi} - \mathbf{L}_p \mathbf{H}]\tilde{\mathbf{x}}(k)$

Equação característica do sistema aumentado: $|z\mathbf{I} - \mathbf{\Phi}_a + \mathbf{\Gamma}_a \mathbf{K}_a|$

Sistema aumentado:

$$\begin{bmatrix} x_I(k+1) \\ \mathbf{x}(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & H \\ 0 & \Phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_I(k) \\ \mathbf{x}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \Gamma \end{bmatrix} u(k) + \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \end{bmatrix} r(k)$$

$$y(k) = \begin{bmatrix} 0 & H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_I(k) \\ \mathbf{x}(k) \end{bmatrix}$$

--

a) Dinâmica do observador: $|z\mathbf{I} - \mathbf{\Phi} + \mathbf{L}_p \mathbf{H}| = z^2 - 0{,}2z + 0{,}01$

$$\mathbf{L}_p \mathbf{H} = \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 & 2l_1 \\ l_2 & 2l_2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} z + l_1 & -1 + 2l_1 \\ -1 + l_2 & z - 0{,}8 + 2l_2 \end{vmatrix} = z^2 + z(l_1 + 2l_2 - 0{,}8) + 1{,}2l_1 + l_2 - 1 \qquad \boxed{\Rightarrow \mathbf{L}_p = \begin{bmatrix} 1{,}0143 \\ -0{,}2071 \end{bmatrix}}$$

Relação entre o observador: p-predito e c-corrente $\mathbf{L}_p = \mathbf{\Phi} \mathbf{L}_c$ $\boxed{\Rightarrow \mathbf{L}_c = \begin{bmatrix} -1{,}0185 \\ 1{,}0143 \end{bmatrix}}$

b) Integração do erro: $x_I(k+1) = x_I(k) + y(k) - r(k)$

Sistema aumentado:

$$\begin{bmatrix} x_I \\ x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}(k+1) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 2 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0{,}8 \end{bmatrix} \mathbf{x}(k) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(k) + \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} r(k)$$

$$y(k) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 \end{bmatrix} \mathbf{x}(k)$$

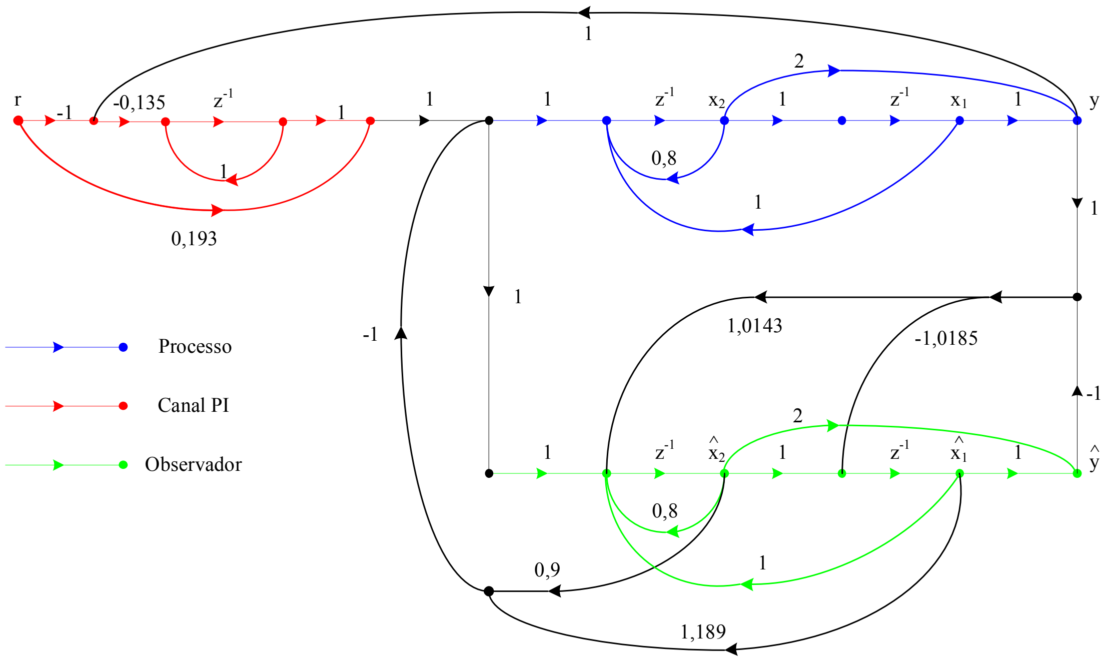
$$|z\mathbf{I} - \phi + \Gamma K| = \begin{bmatrix} z-1 & -1 & -2 \\ 0 & z & -1 \\ k_I & k_1 - 1 & z - 0{,}8 + k_2 \end{bmatrix} = z^3 + z^2(k_2 - 1{,}8) + z(2k_I + k_1 - k_2 - 0{,}2) + k_I - k_1 + 1$$

$$\tilde{a}(z) = (z - 0{,}3)(z - 0{,}3 + 0{,}3i)(z - 0{,}3 - 0{,}3i) = z^3 - 0{,}9z^2 + 0{,}36z - 0{,}054$$

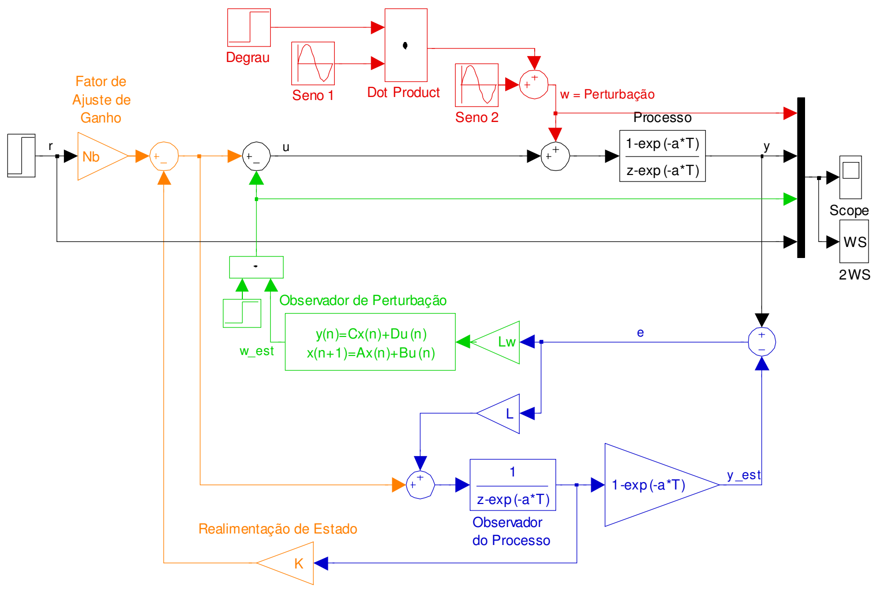
$$\boxed{K = \begin{bmatrix} k_I & k_1 & k_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0{,}135 & 1{,}189 & 0{,}9 \end{bmatrix}}$$

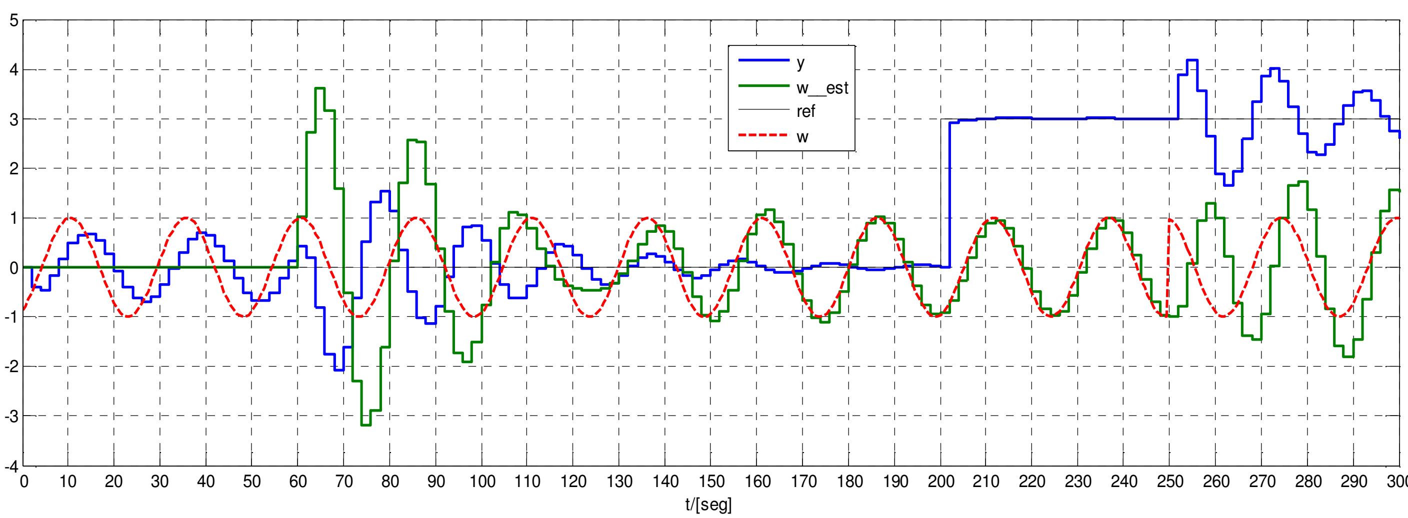
c) Cancelamento de um pólo de MF: Apenas um dos pólos do par complexo conjugado não pode ser cancelado, logo deve-se cancelar o pólo em 0,3. Zero do canal PI: $0{,}3 = 1 - \dfrac{k_I}{\overline{N}} \rightarrow \overline{N} = \dfrac{0{,}135}{0{,}7}$ $\boxed{\overline{N} = 0{,}193}$

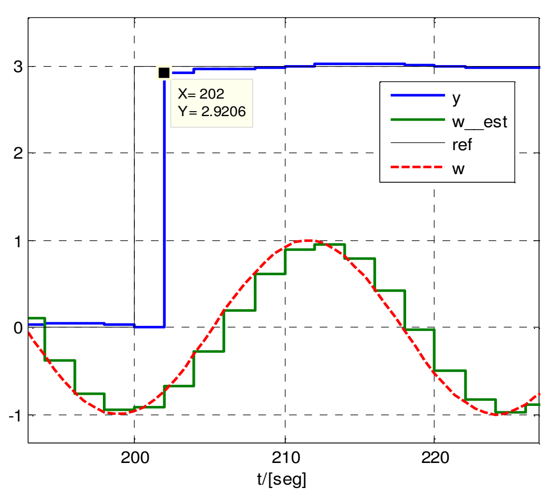
d) Fluxografo



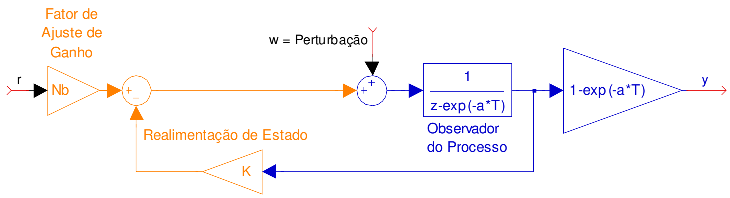
3ª Questão: (2 Pts) Considere o controle no espaço-de-estados de um processo sujeito a perturbações senoidais. O observador permite gerar o sinal de erro para o observador de perturbações. Uma resposta típica é mostrada, a=0,3. Considerando que não há erro em regime permanente para o degrau de referência, qual a função de transferência de malha fechada *Y*(z)/*R*(z)? Qual o ganho *K*? Qual valor de *Nb* foi utilizado?







Considerando a separabilidade, a realimentação de estados produz o seguinte sistema de 1ª ordem:



$$T = 0{,}5; \qquad \frac{Y(z)}{R(z)} = Nb\frac{1-\exp(-aT)}{z-\exp(-aT)+K} = Nb\frac{b}{z-c+K}$$

$$y(k+1) + (-c+K)y(k) = Nb.b.r(k);$$

Do gráfico: T=2 ⟶ b=0,4512 e c=0,5488.

Do detalhe: r(200seg)=3, y(200seg)=0, y(202seg)=2,9206 =$Nb.b.3$ ⟶ $\boxed{Nb=2{,}1577}$

Não há erro em regime permanente ⟶ $Nb.b = 1 - c + K$ ⟶ $\boxed{K=0{,}5223}$

$$\boxed{\frac{Y(z)}{R(z)} = \frac{0{,}9736}{z-0{,}0265}}$$