

# Sintonía de controladores PID basados en eventos por cruce de umbrales fijos.

## Un enfoque desde la teoría clásica de control automático.

Julio Ariel Romero Pérez  
(romeroj@uji.es)

Área de Ingeniería de Sistemas y Automática  
Departamento de Ingeniería de Sistemas Industriales y Diseño  
Universitat Jaume I



# Contenidos

- 1 Introducción
- 2 Control PID basado en eventos
- 3 Método de la función descriptiva
- 4 Control PI con muestreo SSOD
  - Caracterización de ciclos límites.
  - Ajuste del controlador PI
- 5 Control PI con muestreo RQH
  - Introducción al muestreo RQH
  - Robustez ante ciclos límites
  - Evaluación de reglas de ajuste estándar
  - Aplicación interactiva para el diseño de PI

# Contenidos

## 1 Introducción

## 2 Control PID basado en eventos

## 3 Método de la función descriptiva

## 4 Control PI con muestreo SSOD

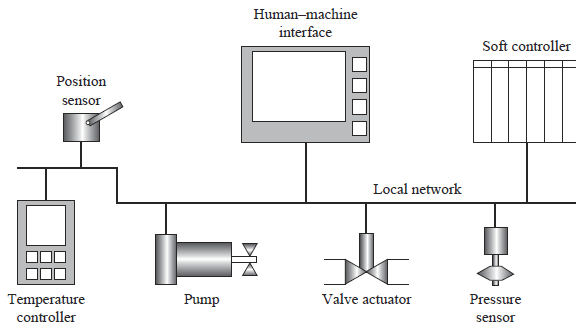
- Caracterización de ciclos límites.
- Ajuste del controlador PI

## 5 Control PI con muestreo RQH

- Introducción al muestreo RQH
- Robustez ante ciclos límites
- Evaluación de reglas de ajuste estándar
- Aplicación interactiva para el diseño de PI

# Sistemas de control distribuido.

Los dispositivos que forma parte del lazo de control están interconectados mediante una red de comunicaciones digitales (alámbrica o inalámbrica).





## Objetivos del control basado en eventos:

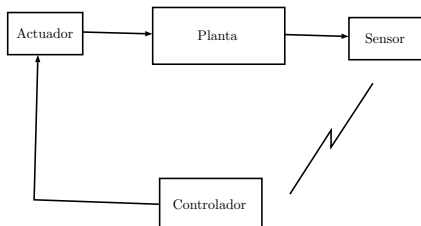
- Reducir la cantidad de datos necesarios para realizar el control en bucle cerrado de sistemas continuos.
- Conseguir lo anterior sin degradar el comportamiento del sistema, tanto en desempeño como robustez, respecto del control periódico.

Con el control basado en eventos se trata de reducir el tráfico de datos por las redes de comunicación.

## Objetivos del control basado en eventos:

Con la reducción del tráfico de datos por la redes de comunicación se consigue:

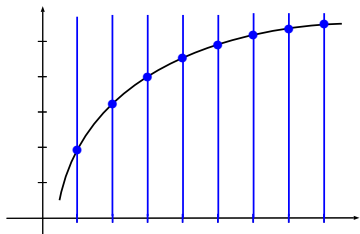
- Reducir la pérdida de datos y los retardos en las comunicaciones.
- Disminuir el consumo de baterías para el envío de datos en sensores auto-alimentados.



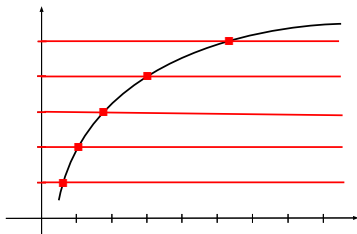
## Objetivos del control basado en eventos:

- Para conseguir lo anterior existen varias estrategias para realizar el muestreo de las señales en los sensores y enviarla al controlador.
- Una de las más eficaces en cuanto a la reducción del número de muestras es el muestreo por cruce de nivel:

### Muestreo periódico



### Muestreo por cruce de nivel





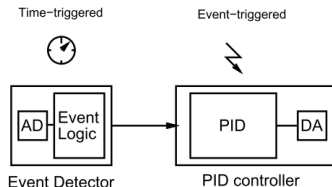
# Control distribuido basados en eventos para sistemas continuos.

- Varias estrategias de control han sido adaptadas al control basado en eventos.
- Artículos sobre estado del arte del control basado en eventos:
  - Dormido, S., Sánchez, J. y Kofman, E. (2008) Muestreo, Control y Comunicación Basados en Eventos, Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial, 5(1), pp. 5-26.
  - E. Aranda-Escolástico et al., Event-Based Control: A Bibliometric Analysis of Twenty Years of Research in IEEE Access, vol. 8, pp. 47188-47208, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2978174.

# Contenidos

- 1 Introducción
- 2 Control PID basado en eventos
- 3 Método de la función descriptiva
- 4 Control PI con muestreo SSOD
  - Caracterización de ciclos límites.
  - Ajuste del controlador PI
- 5 Control PI con muestreo RQH
  - Introducción al muestreo RQH
  - Robustez ante ciclos límites
  - Evaluación de reglas de ajuste estándar
  - Aplicación interactiva para el diseño de PI

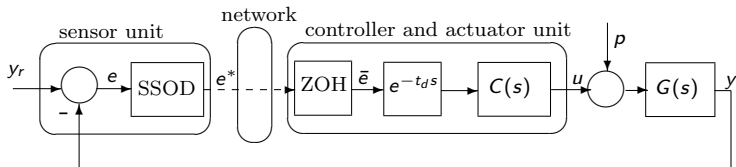
- Primer trabajo sobre PID basado en eventos: *K. E. Årzén, A simple event-based PID controller, 14th IFAC World Congr., pp. 423-428, 1999.*



- El bloque Event-Logic define una estrategia de muestro "send on delta" (SOD): solo se actualiza la salida del controlador si se cumple:

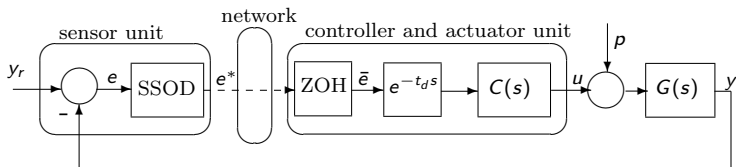
$$(e(t) - e(t_k)) > \delta \text{ OR } h_{act} > h_{max}$$

# Networked control systems based on SSOD sampling strategy

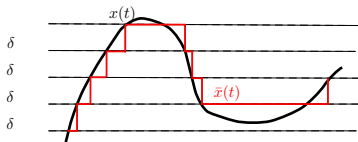
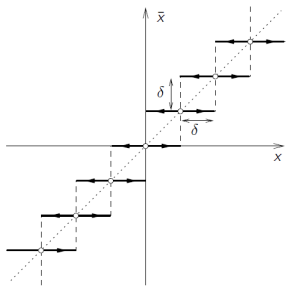


Manuel Beschi, Sebastián Dormido, José Sanchez, and Antonio Visioli. Characterization of symmetric send-on-delta PI controllers. *Journal of Process Control*, 22(10):1930–1945, December 2012.

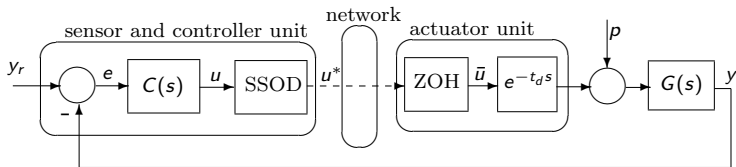
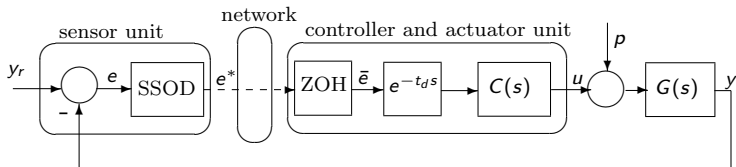
# Networked control systems based on SSOD sampling strategy



## SSOD-ZOH block



# Networked control systems based on SSOD sampling strategy



Manuel Beschi, Sebastián Dormido, José Sanchez, and Antonio Visioli. Characterization of symmetric send-on-delta PI controllers. *Journal of Process Control*, 22(10):1930–1945, December 2012.

# Networked control systems based on SSOD sampling strategy

## Some bibliography

- Manuel Beschi, Sebastián Dormido, José Sanchez, and Antonio Visioli. Characterization of symmetric send-on-delta PI controllers. *Journal of Process Control*, 22(10):1930–1945, December 2012.
- Jesús Chacón, José Sánchez, Antonio Visioli, Luis Yebra, and Sebastián Dormido. Characterization of limit cycles for self-regulating and integral processes with PI control and send-on-delta sampling. *Journal of Process Control*, 23(6):826–838, 2013.
- Manuel Beschi and Antonio Visioli. Tuning of symmetric send-on-delta proportional-integral controllers. *IET Control Theory and Applications*, 8, 2013.

# Networked control systems based on SSOD sampling strategy

## Some bibliography

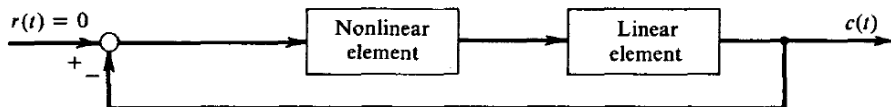
- Manuel Beschi, Sebastián Dormido, José Sanchez, and Antonio Visioli. Characterization of symmetric send-on-delta PI controllers. *Journal of Process Control*, 22(10):1930–1945, December 2012. **controller: PI, processes: FOPTD**
- Jesús Chacón, José Sánchez, Antonio Visioli, Luis Yebra, and Sebastián Dormido. Characterization of limit cycles for self-regulating and integral processes with PI control and send-on-delta sampling. *Journal of Process Control*, 23(6):826–838, 2013. **controller: PI, processes: IPTD, FOPTD, SOPTD**
- Manuel Beschi and Antonio Visioli. Tuning of symmetric send-on-delta proportional-integral controllers. *IET Control Theory and Applications*, 8, 2013. **controller: PI, processes: FOPTD**



# Contenidos

- 1 Introducción
- 2 Control PID basado en eventos
- 3 Método de la función descriptiva**
- 4 Control PI con muestreo SSOD
  - Caracterización de ciclos límites.
  - Ajuste del controlador PI
- 5 Control PI con muestreo RQH
  - Introducción al muestreo RQH
  - Robustez ante ciclos límites
  - Evaluación de reglas de ajuste estándar
  - Aplicación interactiva para el diseño de PI

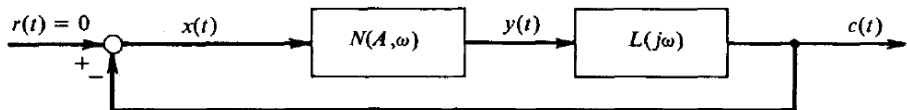
Sea el sistema Wiener-Hammerstein mostrado en la siguiente figura:



- Bajo la hipótesis de que el elemento lineal es suficientemente filtrante, el comportamiento del elemento no lineal se puede caracterizar matemáticamente como:

$$N(A, \omega) = \frac{\text{Amplitud del armónico 1 de la serie de Fourier de la salida}}{\text{Amplitud del seno en la entrada}}$$

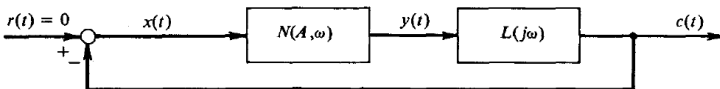
- Los armónicos de orden superior de la serie de Fourier se consideran despreciables debido al efecto filtrante de la parte lineal del sistema.



- De la ecuación característica  $1 + N(A, \omega)L(j\omega) = 0$  se puede obtener la condición para la existencia de ciclos límites:

Existirán ciclos límite para aquellas frecuencias  $\omega_c$  y amplitudes  $A_c$  en las que se cumpla:

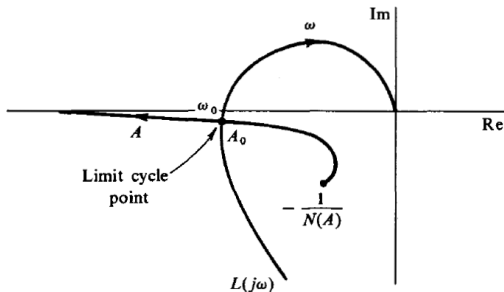
$$L(j\omega_c) = -\frac{1}{N(A_c, j\omega_c)}$$



- Si el ciclo límite es estable, entonces  $x(t)$  presentará oscilaciones sostenidas de frecuencia  $\omega_o$  y amplitud  $A_o$  para las que se cumple:

$$L(j\omega_o) = -\frac{1}{N(A_o, j\omega_o)}$$

- Ejemplo:



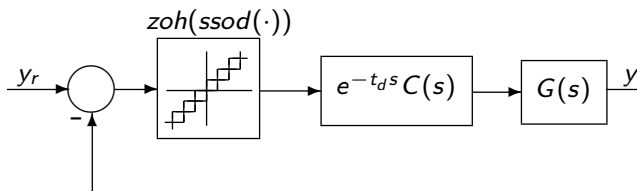
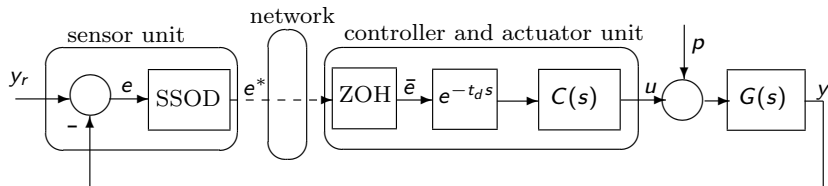
# Contenidos

- 1 Introducción
- 2 Control PID basado en eventos
- 3 Método de la función descriptiva
- 4 Control PI con muestreo SSOD**
  - Caracterización de ciclos límites.
  - Ajuste del controlador PI
- 5 Control PI con muestreo RQH
  - Introducción al muestreo RQH
  - Robustez ante ciclos límites
  - Evaluación de reglas de ajuste estándar
  - Aplicación interactiva para el diseño de PI

# Contenidos

- 1 Introducción
- 2 Control PID basado en eventos
- 3 Método de la función descriptiva
- 4 Control PI con muestreo SSOD**
  - Caracterización de ciclos límites.
  - Ajuste del controlador PI
- 5 Control PI con muestreo RQH
  - Introducción al muestreo RQH
  - Robustez ante ciclos límites
  - Evaluación de reglas de ajuste estándar
  - Aplicación interactiva para el diseño de PI

# Wiener-Hammerstein close loop systems equivalent to the networked control systems with SSOD sampling strategy



## Describing function of the $zoh(ssod(\cdot))$ block

Describing function (see prove in <sup>1</sup>)

$$N = \frac{2\delta}{\pi A} \left[ 1 + \mathbf{A}_m + 2 \sum_{k=1}^{m-1} \mathbf{A}_k \right] - jm \frac{2\delta^2}{\pi A^2} \quad (1)$$

where

$$\mathbf{A}_m = \sqrt{1 - \left(m \frac{\delta}{A}\right)^2}, \mathbf{A}_k = \sqrt{1 - \left(k \frac{\delta}{A}\right)^2} \quad (2)$$

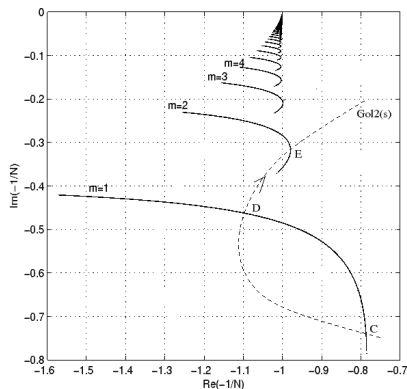
and  $m = \left\lfloor \frac{A}{\delta} \right\rfloor$  is the number of output levels for a sinusoidal input with amplitude  $A$ .

<sup>1</sup>Julio Ariel Romero Pérez, Roberto Sanchis Llopis, A new method for tuning PI controllers with symmetric send-on-delta sampling strategy, ISA Transactions, Volume 64, 2016, Pages 161-173, ISSN 0019-0578,

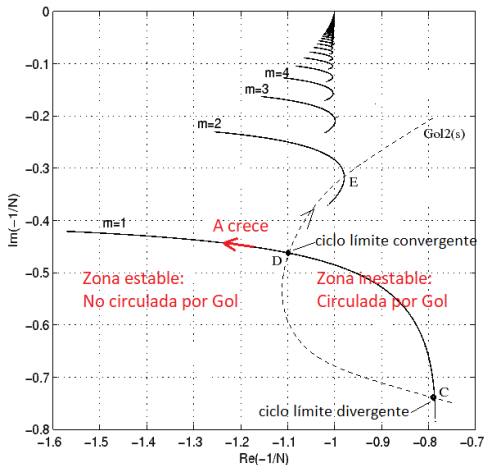


## Polar plot of $-1/N$ and examples of limit cycle intersection points

The polar plot of  $-1/N$  can be obtained by evaluating  $N$  for  $\delta/A \in [0, 1]$ .



# Polar plot of $-1/N$ and examples of limit cycle intersection points



# Example

$$G_3(s) = \frac{9}{(s+1)(s^2+2s+9)} \quad (3a)$$

$$C_3(s) = 1,5 \left( 1 + \frac{0,1s}{1+0,01s} + \frac{1}{0,42s} \right) \quad (3b)$$

# Example

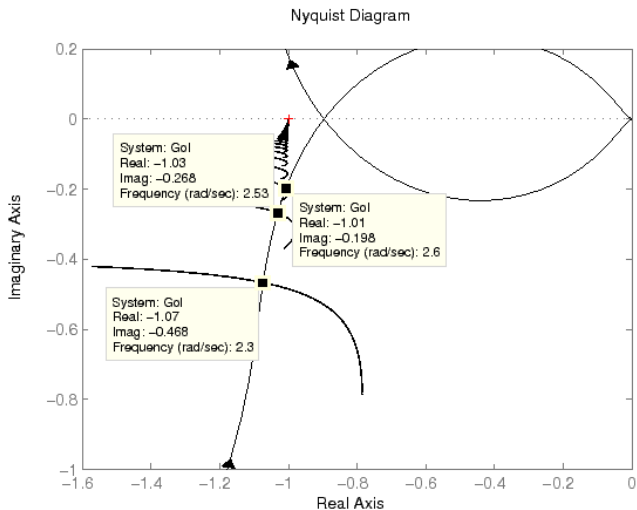


Figura: Nyquist diagram for  $C_3(s)G_3(s)$  and the plot of  $-1/N$ .

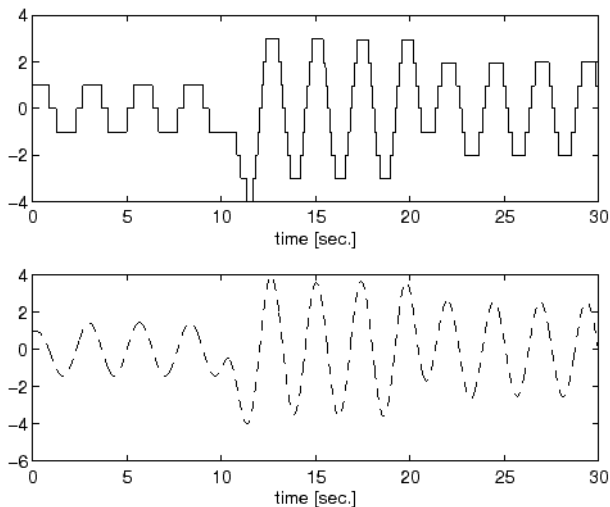
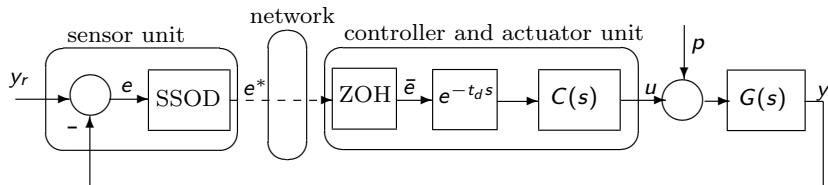


Figura: Time response of  $e$  and  $\bar{e}$  for  $\delta = 1$  in example 3.

# Contenidos

- 1 Introducción
- 2 Control PID basado en eventos
- 3 Método de la función descriptiva
- 4 Control PI con muestreo SSOD**
  - Caracterización de ciclos límites.
  - **Ajuste del controlador PI**
- 5 Control PI con muestreo RQH
  - Introducción al muestreo RQH
  - Robustez ante ciclos límites
  - Evaluación de reglas de ajuste estándar
  - Aplicación interactiva para el diseño de PI

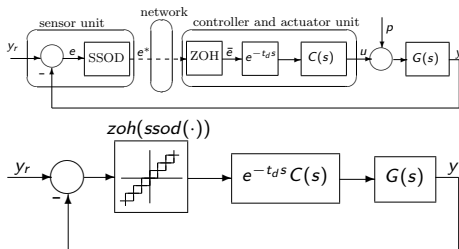
# Planteamiento del problema



- El muestreo SSOD puede inducir ciclos límites, provocando oscilaciones sostenidas no deseadas en la respuesta del sistema.
- En general, estas oscilaciones no son deseadas en el funcionamiento normal de los lazos de control, por lo que deben ser evitadas.
- Para ello el controlador  $C(s)$  debe ser convenientemente diseñado.

# Describing function approach

## SSOD-C(s) architecture



Condition for stability (avoid limit cycles)

$$G_{ol}(j\omega) \neq -\frac{1}{N} \quad \forall \omega$$

where:

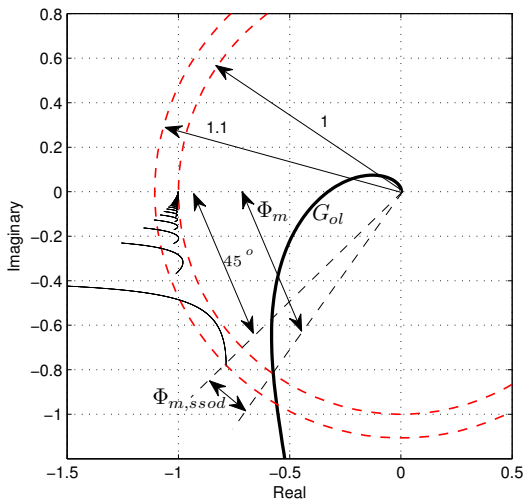
$$G_{ol}(j\omega) = C(j\omega)G(j\omega)e^{-t_d j\omega}$$

$N$ : describing function of the  $zoh(ssod(\cdot))$  block.



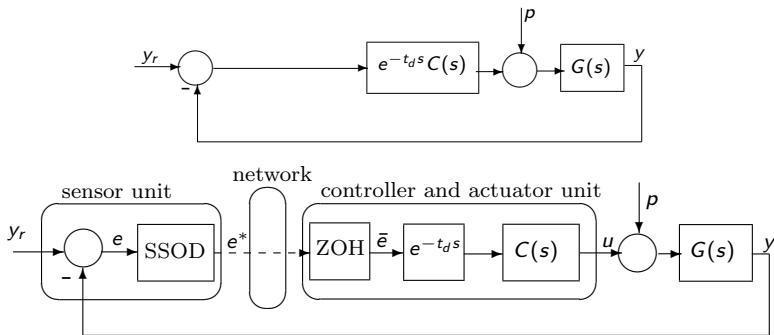
# Robustness measurement in SSOD based systems

Condition to avoid limit cycles:  $G_{ol}(j\omega) \neq -\frac{1}{N} \quad \forall \omega$



## Rule of thumb for tuning SSOD based controllers.

- The controller  $C(s)$  must be designed such that for the **continuous** control loop the phase margin fulfills:  $\Phi_m > 45^\circ$ . Reasonable values:  $50^\circ \leq \Phi_m \leq 65^\circ$ <sup>2</sup>.



<sup>2</sup>Romero, J.A.; Sanchis, R.; Penarrocha, I., A simple rule for tuning Event- Based PID controllers with Symmetric Send-On-Delta sampling strategy, Emerging Technology and Factory Automation (ETFA), 2014 IEEE , vol., no., pp.1,8, 16-19 Sept. 2014

## Simulation study

- PID controller:

$$C(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right)$$

- PID tuning method proposed in <sup>3</sup> is used for tuning the controller.
- The design method can be summarized as a constrained optimization approach in which the proposed PI parameters ( $K_p$  and  $T_i$ ) are those that :
  - 1 Maximize the controller integral gain ( $K_i = \frac{K_p}{T_i}$  ),
  - 2 Subject to the following constraints:
    - $\Phi_m = \Phi_{m,r}$
    - $\gamma_m \geq \gamma_{m,r}$

---

<sup>3</sup>Roberto Sanchis, Julio A. Romero, Pedro Balaguer (2010) Tuning of PID controllers based on simplified single parameter optimisation, International Journal of Control, 83:9, 1785-1798, DOI: 10.1080/00207179.2010.495162

# Simulation study

$$G_1(s) = \frac{e^{-5s}}{(s+1)^3}$$

$$G_2(s) = \frac{9}{(s+1)(s^2+2s+9)}$$

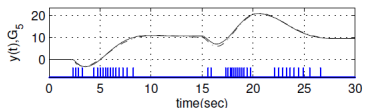
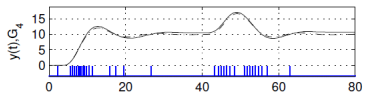
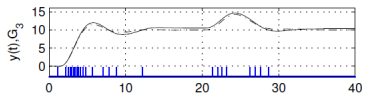
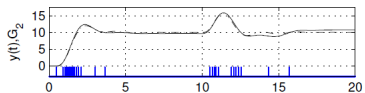
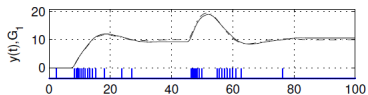
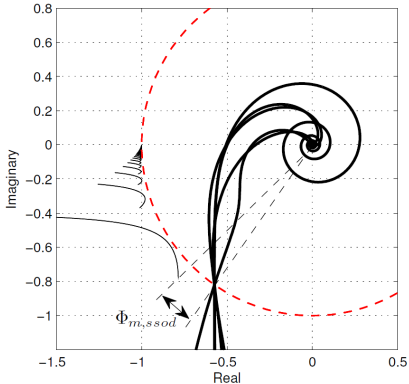
$$G_3(s) = \frac{1}{(s+1)^4}$$

$$G_4(s) = \frac{1}{(s+1)^7}$$

$$G_5(s) = \frac{1-2s}{(s+1)^3}$$

## Simulation study

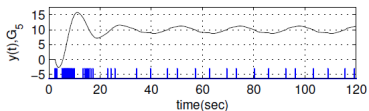
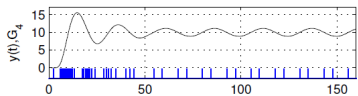
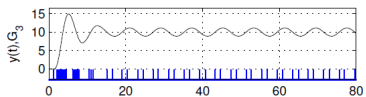
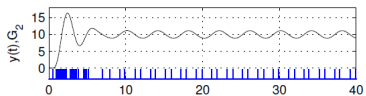
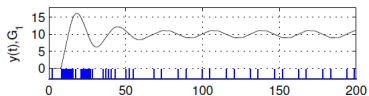
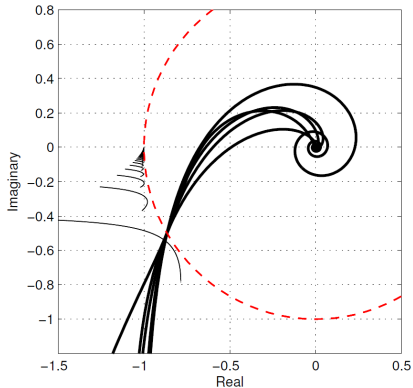
Polar plot of  $-1/N$  and the open loop transfer functions for PID controller designed for systems  $G_1(s) - G_5(s)$  with  $\phi_{m,ssod} = 10^\circ$  ( $\phi_m = 55^\circ$ ).



## Simulation study

Polar plot of  $-1/N$  and the open loop transfer functions for PID controller designed for systems

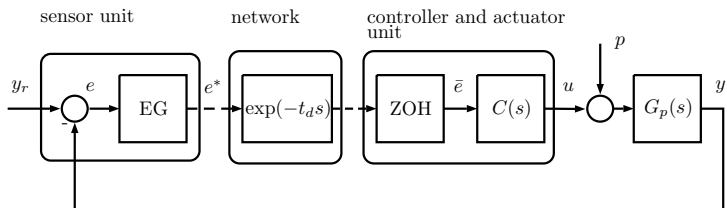
$G_1(s) - G_5(s)$  with  $\phi_{m,ssod} = -15^\circ$  ( $\phi_m = 30^\circ$ ).



# Contenidos

- 1 Introducción
- 2 Control PID basado en eventos
- 3 Método de la función descriptiva
- 4 Control PI con muestreo SSOD
  - Caracterización de ciclos límites.
  - Ajuste del controlador PI
- 5 Control PI con muestreo RQH**
  - Introducción al muestreo RQH
  - Robustez ante ciclos límites
  - Evaluación de reglas de ajuste estándar
  - Aplicación interactiva para el diseño de PI

General control loop scheme for EG-PI controllers (EG: event generator):



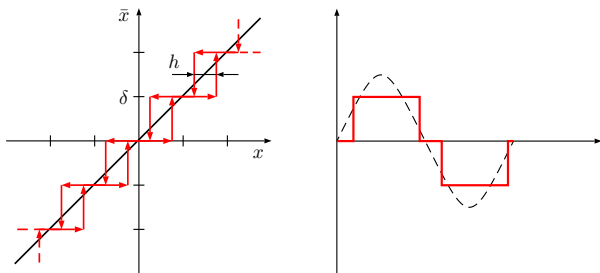


# Contenidos

- 1 Introducción
- 2 Control PID basado en eventos
- 3 Método de la función descriptiva
- 4 Control PI con muestreo SSOD
  - Caracterización de ciclos límites.
  - Ajuste del controlador PI
- 5 Control PI con muestreo RQH**
  - Introducción al muestreo RQH**
  - Robustez ante ciclos límites
  - Evaluación de reglas de ajuste estándar
  - Aplicación interactiva para el diseño de PI

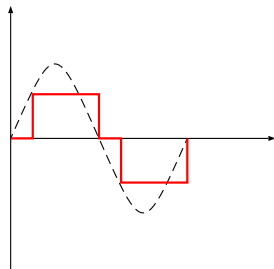
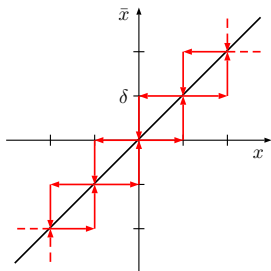
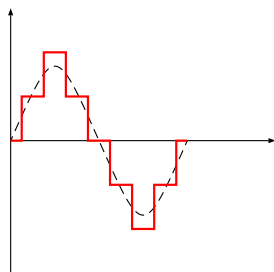
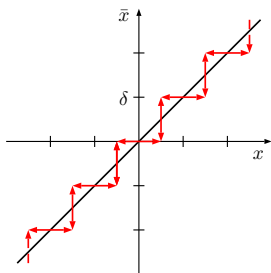
Input-Output characteristic of the RQH sampler:

RQH:  $0 \leq h \leq \delta$



Quantization and hysteresis disengaged

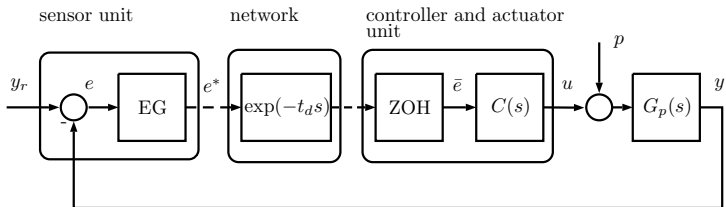
## Input-Output characteristic of the RQH sampler:

SSOD:  $h = \delta$ RQ:  $h = 0$ 

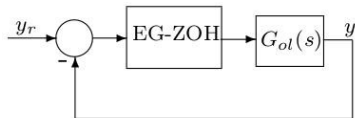
# Contenidos

- 1 Introducción
- 2 Control PID basado en eventos
- 3 Método de la función descriptiva
- 4 Control PI con muestreo SSOD
  - Caracterización de ciclos límites.
  - Ajuste del controlador PI
- 5 **Control PI con muestreo RQH**
  - Introducción al muestreo RQH
  - **Robustez ante ciclos límites**
  - Evaluación de reglas de ajuste estándar
  - Aplicación interactiva para el diseño de PI

## Control loop scheme for event-based PI controllers:



Block scheme equivalent to the one presented in the previous figure:



$$G_{ol}(s) = C(s)G_p(s)e^{-t_d s}$$

Avoiding limit cycle:

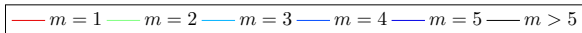
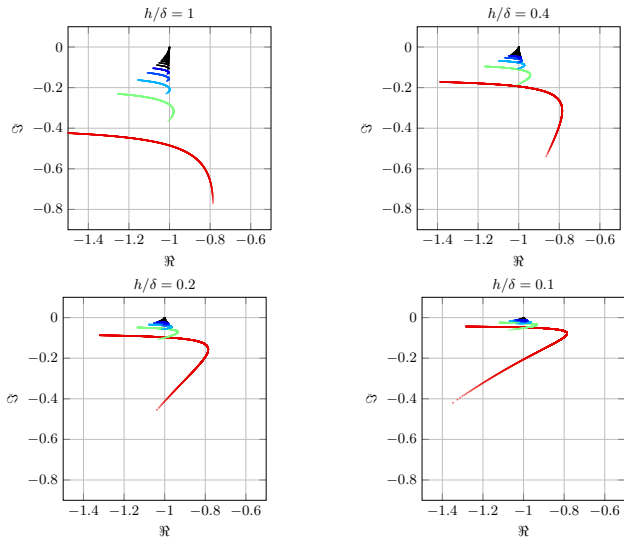
Describing Function theory:

$$G_{ol}(j\omega) \neq -\frac{1}{\mathcal{N}}, \quad \forall \omega$$

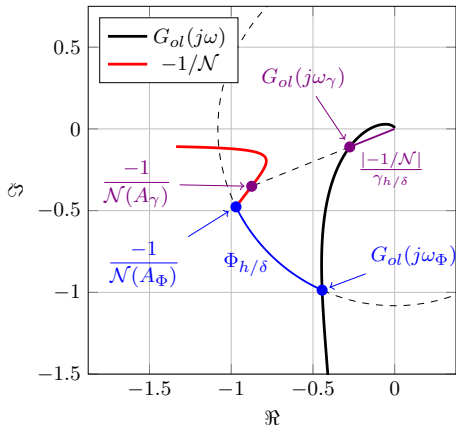
$$\mathcal{N} = \frac{2\delta}{A\pi} \left[ \sum_{k=1}^m \sqrt{1 - \left( \frac{\delta}{A} \left( k + \frac{h}{2\delta} - \frac{1}{2} \right) \right)^2} + \sum_{k=m+1}^{2m} \sqrt{1 - \left( \frac{\delta}{A} \left( 2m - k - \frac{h}{2\delta} + \frac{1}{2} \right) \right)^2} \right] - j \frac{2hm\delta}{A^2\pi}$$

$$m = \left\lfloor \frac{A}{\delta} - \frac{h}{2\delta} + \frac{1}{2} \right\rfloor$$

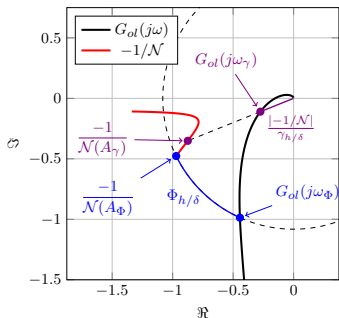
A: amplitude of the sinusoidal oscillation.

Shapes of  $-1/\mathcal{N}$  for RQH samplers with different values of  $h/\delta$ .

Gain and phase margins to the non-linearity  $(\gamma_{h/\delta}, \Phi_{h/\delta})$  for a given open-loop transfer function  $G_{ol}$  in Nyquist diagrams.

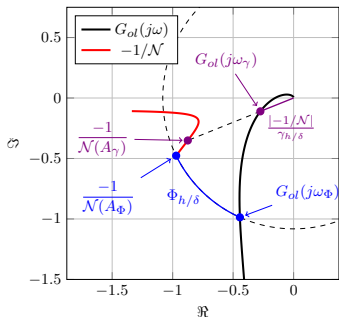




Formal definition of  $\gamma_{h/\delta}$ 

$$\gamma_{h/\delta} = \left| \frac{1}{-\mathcal{N}(A_\gamma)} \right| \left| G_{ol}(j\omega_\gamma) \right|$$

$$(\omega_\gamma, A_\gamma) = \arg \min_{(\omega, A)} \left( \left| \frac{-1}{\mathcal{N}(A)} \right| : \arg(G_{ol}(j\omega)) = \arg\left(\frac{-1}{\mathcal{N}(A)}\right) \right)$$

Formal definition of  $\Phi_{h/\delta}$ 

$$\Phi_{h/\delta} = \arg(G_{ol}(j\omega_{\Phi})) - \arg\left(-\frac{1}{\mathcal{N}(A_{\Phi})}\right)$$

$$(\omega_{\Phi}, A_{\Phi}) = \arg \min_{(\omega, A)} \left( \arg(G_{ol}(j\omega)) - \arg\left(-\frac{1}{\mathcal{N}(A)}\right) : \left|-\frac{1}{\mathcal{N}(A)}\right| = |G_{ol}(j\omega)| \right)$$

# Contenidos

- 1 Introducción
- 2 Control PID basado en eventos
- 3 Método de la función descriptiva
- 4 Control PI con muestreo SSOD
  - Caracterización de ciclos límites.
  - Ajuste del controlador PI
- 5 Control PI con muestreo RQH**
  - Introducción al muestreo RQH
  - Robustez ante ciclos límites
  - Evaluación de reglas de ajuste estándar**
  - Aplicación interactiva para el diseño de PI

PI controller:

$$C(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right),$$

Tuning methods:

**Ziegler-Nichols:** <sup>4</sup> John G. Ziegler and Nathaniel B. Nichols. Optimum settings for automatic controllers. trans. ASME, 64(11), 1942.

**Cohen-Coon:** <sup>4</sup> G. H. Cohen and G. A. Coon. Theoretical consideration of retarded control. Transactions of the ASME, (75):827-834, 1953.

**AMIGO:** <sup>4</sup> K.J. Åström and T. Hägglund. Revisiting the Ziegler-Nichols step response method for PID control. Journal of Process Control, 14(6):635-650, sep 2004.

---

<sup>4</sup>The controller parameters are calculated using a FOPTD model of the process obtained from the step response.

# Classical PI tuning methods evaluation

## Models:

$$G(s) = \frac{e^{-s}}{(Ts + 1)^2},$$

$$T = 0,01, 0,02, 0,05, 0,1, 0,2, 0,3, 0,5, 0,7, 1, \\ 1,3, 1,5, 2, 4, 6, 8, 10, 20, 50, 100, 200, 500$$

$$G(s) = \frac{Te^{-L_1s}}{(T_1s + 1)(Ts + 1)},$$

$$T_1 + L_1 = 1, \quad T = 1, 2, 5, 10 \\ L_1 = 0,01, 0,02, 0,05, 0,1, 0,3, 0,5, 0,7, 0,9, 1$$

$$G(s) = \frac{1}{(s + 1)(Ts + 1)^2},$$

$$T = 0,05, 0,1, 0,2, 0,5, 2, 5, 10$$

$$G(s) = \frac{1}{(s + 1)(\alpha s + 1)(\alpha^2 s + 1)(\alpha^3 s + 1)},$$

$$\alpha = 0,1, 0,2, 0,3, 0,4, 0,5, 0,6, 0,7, 0,8, 0,9$$

$$G(s) = \frac{1 - \alpha s}{(s + 1)^3},$$

$$\alpha = 0,1, 0,2, 0,3, 0,4, 0,5, 0,6, 0,7, 0,8, 0,9, 1, 1,1$$

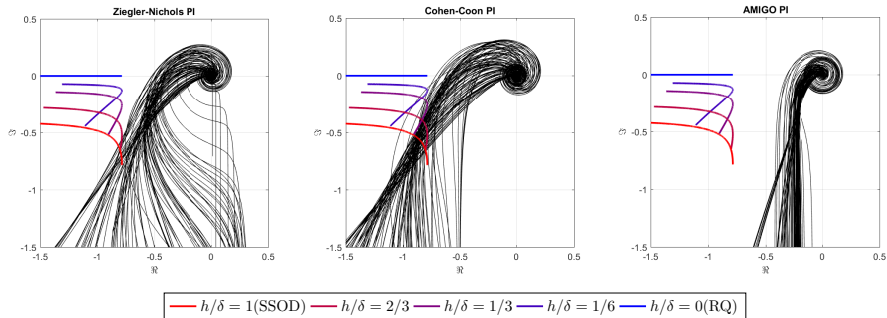
$$G(s) = \frac{1}{(s + 1)((sT)^2 + 1,4sT + 1)},$$

$$T = 0,1, 0,2, 0,3, 0,4, 0,5, 0,6, 0,7, 0,8, 0,9, 1$$

$$G(s) = \frac{1}{(s + 1)^n},$$

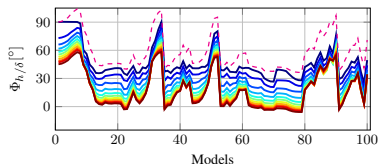
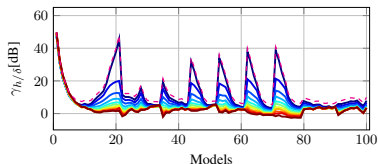
$$n = 3, 4, 5, 6, 7, 8$$

Nyquist plots of the presented batch of processes with the specified controllers and the traces of  $-1/\mathcal{N}$  for  $m = 1$  with different values of  $h/\delta$ .

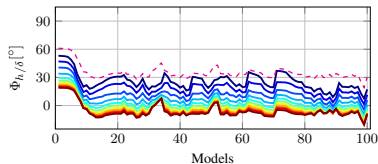
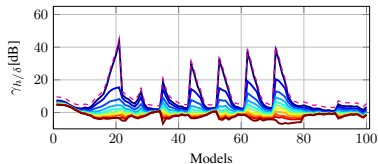


$\gamma_{h/\delta}$  and  $\Phi_{h/\delta}$  for several values of  $h/\delta$  (solid colored lines) and classical gain and phase margins (dashed magenta line) for each tuning method.

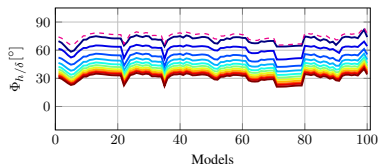
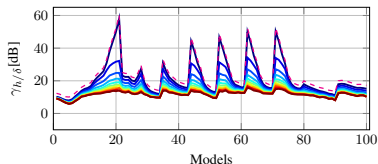
Ziegler  
Nichols



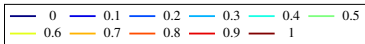
Cohen  
Coon



AMIGO



$h/\delta$  values



## Example 1

This example shows the influence of  $h/\delta$  in the event generation.

- Consider a process whose transfer function is described by:

$$G_p(s) = \frac{e^{-0,3s}}{(s+1)(0,7s+1)}.$$

- The network communication delay is tested to have a latency  $t_d = 0,15$  seconds. Thus, the whole model to be considered for the tuning is described by:

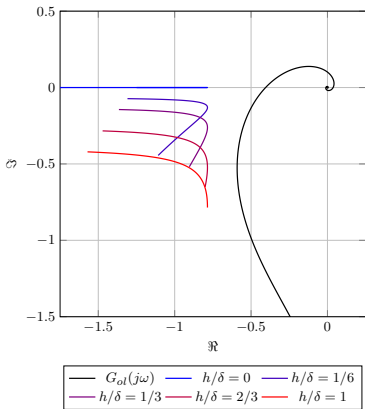
$$G(s) = \frac{e^{-0,45s}}{(s+1)(0,7s+1)}.$$

- A PI controller has been tuned following Ziegler-Nichols tuning rules, obtaining  $K_p = 1,52$  and  $T_i = 2,58$ .



## Example 1

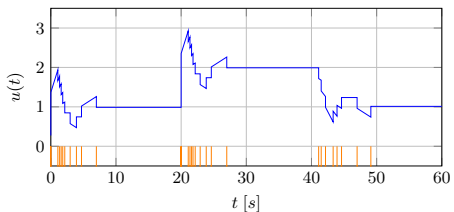
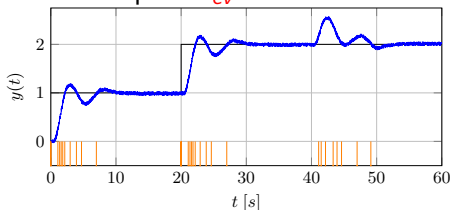
This controller does not make the open-loop transfer function intersect the traces of the inverse negative for any ratio  $h/\delta$ , therefore, it avoids limit cycle oscillations induced by the sampler.



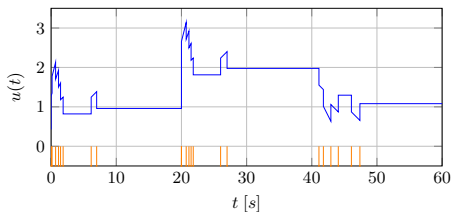
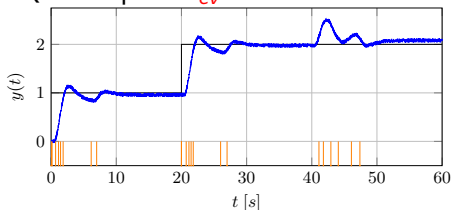
## Example 1

Controlled output  $y$  and control action  $u$  for the system with a SSOD (left) and RQH (right) samplers. The events generated are marked in orange.

SSOD sampler:  $n_{ev} = 31$



RQH sampler:  $n_{ev} = 22$



## Example 2

This example shows the usefulness of DF approach on predicting the oscillation induced by the RQH sampler.

- Consider a process whose transfer function is described by:

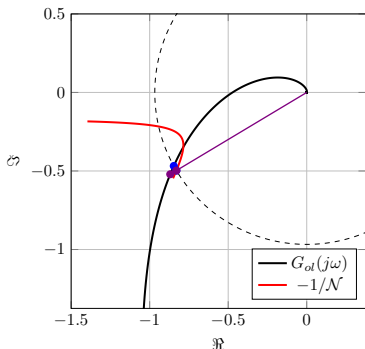
$$G_p(s) = \frac{1 - 0,1s}{(s + 1)^3},$$

- A PI controller has been tuned according to Cohen-Coon tuning rules, resulting in  $K_p = 1,612$  and  $T_i = 1,938$ .

## Example 2

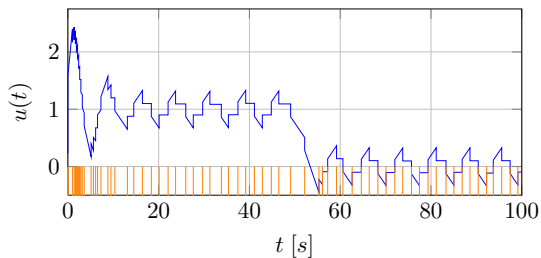
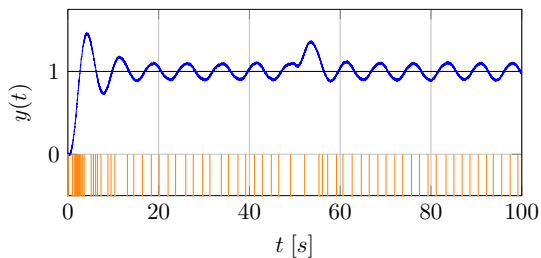
From this specifications two RQH samplers will be designed and tested in the loop.

- RQH 1:  $h/\delta = 0,45$ .



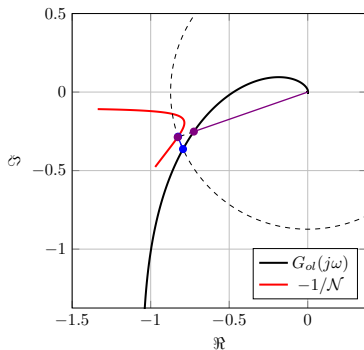
## Example 2

- RQH 1:  $h/\delta = 0,45$ .



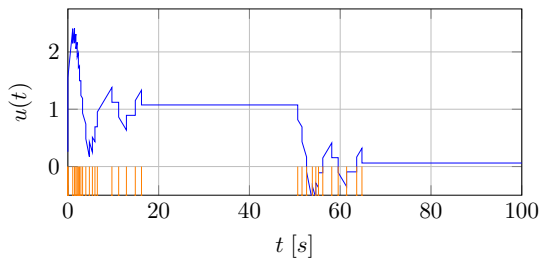
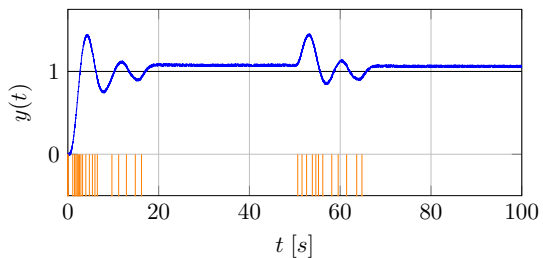
## Example 2

- RQH 2:  $h/\delta = 0,25$ .



## Example 2

- RQH 2:  $h/\delta = 0,25$ .



# Contenidos

- 1 Introducción
- 2 Control PID basado en eventos
- 3 Método de la función descriptiva
- 4 Control PI con muestreo SSOD
  - Caracterización de ciclos límites.
  - Ajuste del controlador PI
- 5 Control PI con muestreo RQH**
  - Introducción al muestreo RQH
  - Robustez ante ciclos límites
  - Evaluación de reglas de ajuste estándar
  - **Aplicación interactiva para el diseño de PI**



# Diseño del controlador PI

Método de diseño <sup>5</sup>:

$$\begin{aligned}
 & \underset{K_p, T_i}{\text{minimize}} && IE \\
 & \text{subject to} && \gamma_{cg} \geq \gamma_{cg_r}, \quad \Phi_{cp} \geq \Phi_{cp_r}, \\
 & && \gamma_{h/\delta} \geq \gamma_{h/\delta_r}, \quad \Phi_{h/\delta} \geq \Phi_{h/\delta_r}
 \end{aligned} \tag{5}$$

donde:

- Márgenes de robustez clásicos
  - $\gamma_{cg}$ : margen de ganancia
  - $\Phi_{cp}$ : margen de fase
- Márgenes de robustez ante ciclos límites
  - $\gamma_{h/\delta}$ : margen de ganancia a  $-\frac{1}{\mathcal{N}(A)}$
  - $\Phi_{h/\delta}$ : margen de fase a  $-\frac{1}{\mathcal{N}(A)}$

---

<sup>5</sup>Miguel-Escrig, O. and Romero-Pérez, J.-A., Tuning procedure for event-based PI controllers under regular quantization with hysteresis, Journal of the Franklin Institute, Volume 358, Issue 9, 2021, 4643-4670.

# Descripción de la aplicación para el diseño de PI con muestreador basado en eventos

- La aplicación ha sido desarrollada en Python.
- Se han usado, entre otras, las siguientes bibliotecas:
  - Control Systems: cálculos de respuestas de frecuencia
  - PyQt5: Interfaz gráfica
- La aplicación consta de una ventana principal, estructurada en diferentes zonas.

# Sintonía de controladores PID basados en eventos por cruce de umbrales fijos.

## Un enfoque desde la teoría clásica de control automático.

Julio Ariel Romero Pérez  
(romeroj@uji.es)

Área de Ingeniería de Sistemas y Automática  
Departamento de Ingeniería de Sistemas Industriales y Diseño  
Universitat Jaume I

