



## Control Adaptativo

Los tradicionales reguladores PID de parámetros fijos se comportan bien en el control de sistemas:

- Lineales con parámetros del proceso invariantes en el tiempo.
- No lineales que trabajan entorno a un punto fijo de funcionamiento.

Para adaptarse a otras situaciones como:

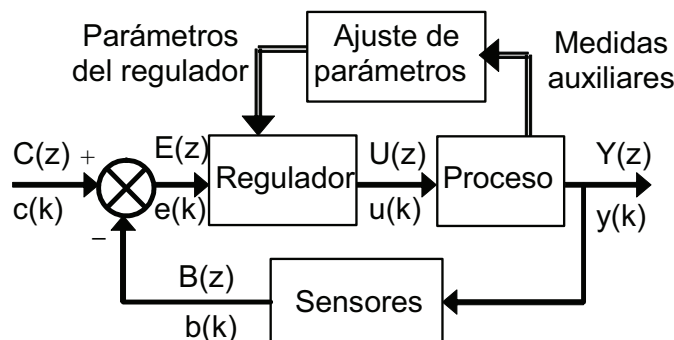
- Procesos no lineales en general.
- Procesos en los que exista la posibilidad de variación en el tiempo de los parámetros que definen su comportamiento.

es conveniente un sistema que ajuste automáticamente los parámetros del regulador en función del comportamiento del proceso, dando lugar al llamado "**Control Adaptativo**".



## Adaptación en bucle abierto o por prealimentación

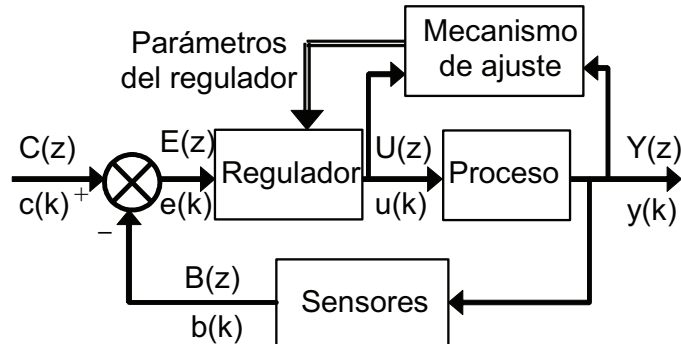
Se utilizan señales medibles del proceso que puedan indicar los posibles cambios que se hayan producido en el mismo para realizar los ajustes adecuados en el regulador. El método más elemental es el "Control por ajuste de ganancia" (Gain scheduling).



Es preciso determinar previamente cuales son los ajustes más adecuados para cada situación operativa del proceso.

## Adaptación en bucle cerrado o por realimentación

Se ajusta el regulador tomando la información del comportamiento del proceso a través de las señales de entrada y salida.

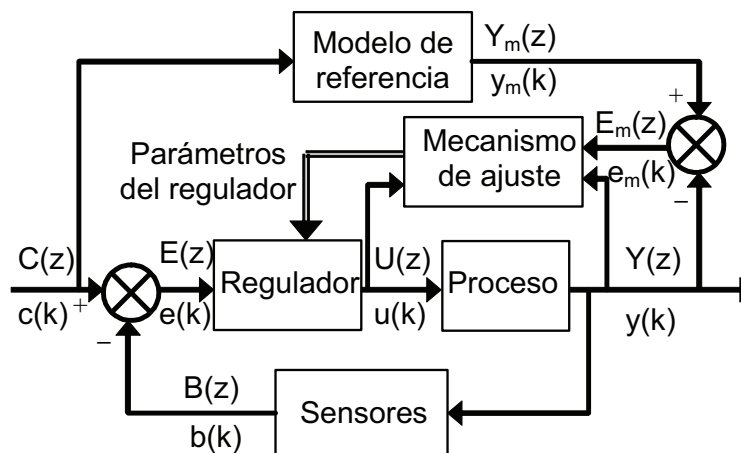


Dos métodos básicos que se ajustan a este esquema son:

- MRAC (Model-Reference Adaptive Controllers)
- STC (Self-Tuning Controllers)

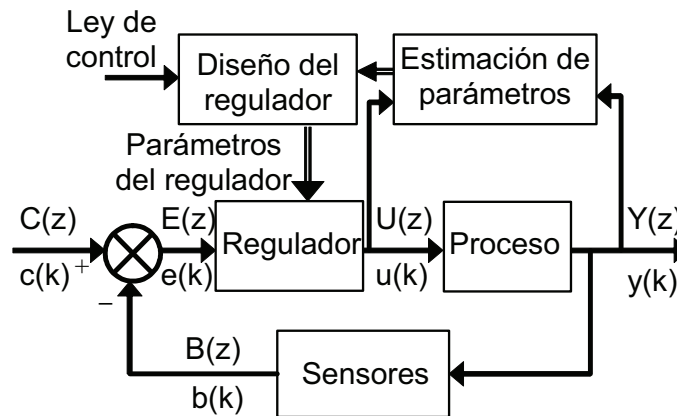
## MRAC (Model-Reference Adaptive Controllers)

Se ajustan los parámetros del regulador de manera que el comportamiento del sistema realimentado sea similar al de un modelo de referencia dado.



## STC (Self-Tuning Controllers)

Se identifican los parámetros del proceso para, en función de estos y del método de diseño prefijado, calcular los parámetros del regulador.



## Aplicación del control adaptativo

El control adaptativo se puede emplear en distintos escenarios:

- Para el ajuste automático del algoritmo de control, arrancando el sistema con el regulador adaptativo para que una vez que el comportamiento sea adecuado se desconecte y queden fijos los parámetros del regulador.
- Para realizar el trabajo previo de obtención de los parámetros del regulador adecuados para cada una de las condiciones de funcionamiento del sistema antes de aplicar el "Control por ajuste de ganancia".
- Para mantener activo indefinidamente el algoritmo de ajuste de los parámetros del controlador con el objeto de aplicarlo a procesos que varían con el tiempo.

También se pueden realizar combinaciones de las aplicaciones anteriores.

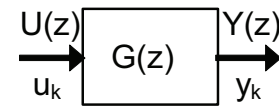
## Identificación en tiempo real (online) del proceso

Muchas de las técnicas de control adaptativo se basan en la identificación de parámetros del modelo del proceso durante su funcionamiento. El método de RLS (Recursive Least Squares, Mínimos Cuadrados Recursivo) se puede aplicar para esta identificación del proceso.

La identificación por mínimos cuadrados se realiza mediante una minimización del error cuadrático medio en la estimación de los parámetros del proceso.

Sea un proceso lineal e invariante cuyo modelo, función de transferencia y ecuación en diferencias, sean:

$$G(z) = \frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{b_1 \cdot z^{-1} + b_2 \cdot z^{-2} + \dots + b_{n-1} \cdot z^{-(n-1)} + b_n \cdot z^{-n}}{1 + a_1 \cdot z^{-1} + a_2 \cdot z^{-2} + \dots + a_{n-1} \cdot z^{-(n-1)} + a_n \cdot z^{-n}}$$



$$y_k(k) = -a_1 \cdot y_{k-1} - a_2 \cdot y_{k-2} - \dots - a_{n-1} \cdot y_{k-(n-1)} - a_n \cdot y_{k-n} + b_1 \cdot u_{k-1} + b_2 \cdot u_{k-2} + \dots + b_{n-1} \cdot u_{k-(n-1)} + b_n \cdot u_{k-n}$$

## Identificación por mínimos cuadrados

Si se dispone de los valores de "y<sub>k</sub>" y "u<sub>k</sub>" para k=0,...,N, se puede disponer de N-(n-1) particularizaciones para la ecuación en diferencias:

$$\begin{bmatrix} y_n \\ y_{n+1} \\ \vdots \\ y_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -y_{n-1} & \dots & -y_0 & u_{n-1} & \dots & u_0 \\ -y_n & \dots & -y_1 & u_n & \dots & u_1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -y_{N-1} & \dots & -y_{N-n} & u_{N-1} & \dots & u_{N-n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_n \\ b_1 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix}$$

La ecuación matricial se abrevia como:  $Y = \Psi \Theta$

y se puede obtener la estimación de los parámetros "a<sub>i</sub>" y "b<sub>i</sub>":

$$\Theta = (\Psi^T \Psi)^{-1} \Psi^T Y$$



## Algoritmo RLS (I)

La ecuación anterior se puede utilizar para el cálculo "offline" pero es muy costosa para su uso en tiempo real (online). Sin embargo, se puede modificar para recalculer los parámetros "a<sub>i</sub>" y "b<sub>i</sub>" en cada instante de muestreo, actualizando los nuevos valores de "y<sub>k</sub>" y "u<sub>k</sub>".

El algoritmo se inicializa de la siguiente manera:

- Se fija el orden del modelo "n".
- Se define el vector de parámetros estimados en el periodo "k" inicializándolo con valor nulo:  $\theta_k = (a_1 a_2 \dots a_n b_1 b_2 \dots b_n)^T \quad \theta_0 = 0$
- Se define el vector con la historia de "y" y "u" inicializándolo con valor nulo:  $\psi_{k-1} = (-y_{k-1} \quad -y_{k-2} \dots -y_{k-n} \quad u_{k-1} \quad u_{k-2} \dots u_{k-n})^T \quad \psi_0 = 0$
- Se define una matriz P<sub>k</sub> de dimensión "2n x 2n" con valor inicial P<sub>0</sub>=α·I, siendo "I" la matriz identidad y "α" un valor real grande (p.ej. 10<sup>5</sup>).
- Se define el factor de olvido "λ ≤ 1", en principio igual a "1" ( M=λ/(1- λ) ).



## Algoritmo RLS (II)

Posteriormente, dentro de cada instante de muestreo "k=1, 2, 3,..." se han de realizar los siguientes pasos:

- Obtener los valores "y<sub>k</sub>" y "u<sub>k</sub>".
- Calcular la matriz de ganancias:  $L_k = \frac{P_{k-1} \cdot \psi_{k-1}}{\psi_{k-1}^T \cdot P_{k-1} \cdot \psi_{k-1} + \lambda}$
- Calcular el error residual a priori:  $\varepsilon_k = y_k - \psi_{k-1}^T \cdot \theta_{k-1}$
- Actualizar la estimación de parámetros:  $\theta_k = \theta_{k-1} + \varepsilon_k \cdot L_k$
- Actualizar la matriz de covarianzas:  $P_k = \frac{1}{\lambda} (I - L_k \cdot \psi_{k-1}^T) \cdot P_{k-1}$
- Actualizar la matriz  $\Psi_k$  con los valores "y<sub>k</sub>" y "u<sub>k</sub>" recién obtenidos.



## Algoritmo RLS (III)

Durante la aplicación del algoritmo RLS en la identificación de procesos se deben tener en cuenta varios aspectos:

- **Excitación persistente:** la señal de entrada debe excitar todos los modos del proceso.
- **Identificación en cadena cerrada:** el regulador genera la entrada al proceso pudiendo hacer que no se exciten todos los modos del sistema.
- **Factor de olvido:** su valor es determinante en la identificación de procesos con parámetros variantes.
  - Cuanto más se acerca " $\lambda$ " a 1, más memoria " $M=\lambda/(1-\lambda)$ " tiene el sistema. Es menos sensible a ruidos en las medidas pero responde lentamente a cambios en los parámetros del proceso.
  - Para conseguir sensibilidad en un momento dado a cambios en los parámetros aunque " $\lambda=1$ ", se puede reiniciar "P" con un valor similar al inicial.



## Algoritmo RLS (IV)

- **Estallido del estimador:** si se combina " $\lambda < 1$ " con una baja excitación en la entrada, los elementos de "P" pueden crecer exponencialmente. Para evitar este problema se puede optar por dos soluciones:
  - Detener el estimador hasta que se detecte variabilidad en la entrada.
  - Hacer " $\lambda=1$ " hasta que se detecte variabilidad en la entrada.
- **Sistemas no lineales:**
  - Si el sistema es no lineal pero se mantiene en torno a un punto de funcionamiento, se añade un término constante a la ecuación en diferencias.
  - Si el sistema es no lineal y cambia su punto de funcionamiento, se aplica lo anterior, además de considerarlo como de parámetros variantes.
- **Ruido no blanco:** el algoritmo RLS es sensible a la presencia de ruido no blanco que produce estimaciones de los parámetros con desviaciones sobre los valores reales. Es necesario modificar el modelo para adaptarse a estas situaciones (modelo ARMAX).