UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA

CONTROL AVANZADO DE PROCESOS

PROFESOR: FRANCISCO CUBILLOS M.
ALUMNOS: LUIS HENRÍQUEZ V.
JOSÉ LUIS SALAZAR N.

INTRODUCCIÓN

- *Se entiende por Control Avanzado (CA) a cualquier algoritmo o estrategia que se desvíe del control clásico lineal. El origen de éste radica en el grado de complejidad que presentan las plantas modernas de procesos y los avances computacionales y tecnológicos que permiten la implementación de sofisticados algoritmos que no se podían observar usando tecnología analógica.*

INTRODUCCIÓN

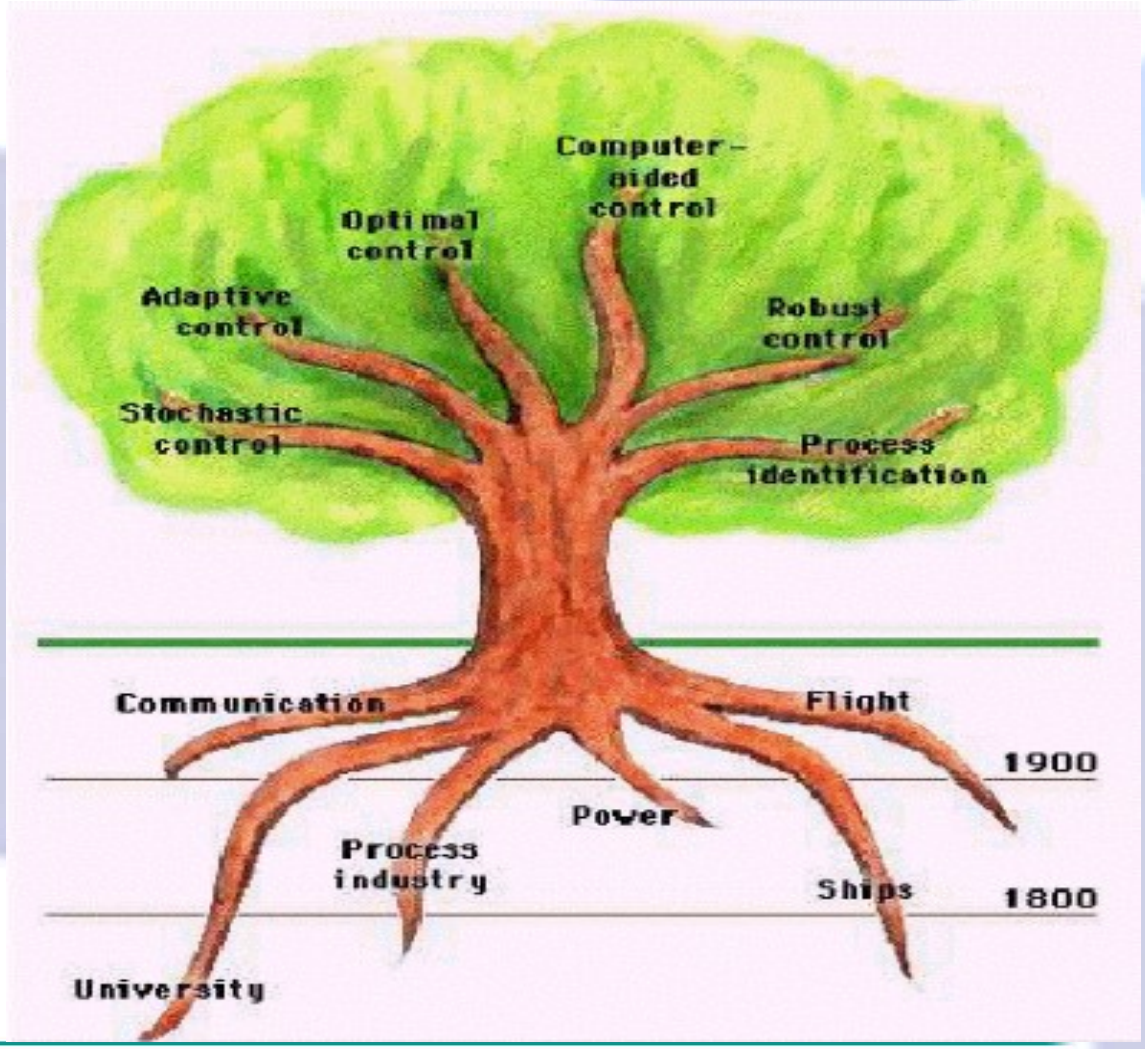
- *Se ha demostrado que el Control Avanzado puede:*
  - *Mejorar la productividad*
  - *Reducir el consumo de energía*
  - *Aumentar la capacidad*
  - *Mejorar la calidad y consistencia del producto.*

  Estas ventajas son claramente enormes y son alcanzadas reduciendo la variabilidad del proceso, por lo tanto, permiten que las plantas operen a una capacidad previamente establecida.

OBJETIVOS

- *El presente informe pretende describir los distintos algoritmos de control con sus aplicaciones, ventajas y desventajas, que se encuentran dentro del concepto de Control Avanzado.*

ÁRBOL DEL CONTROL



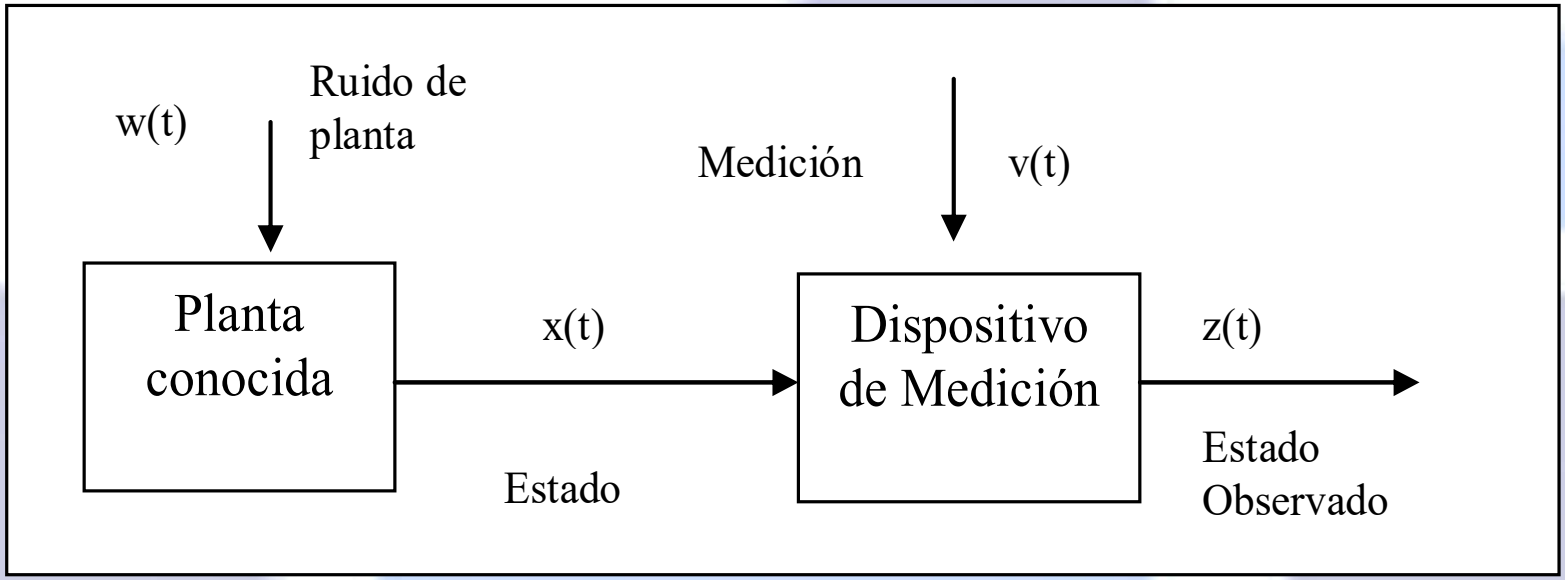
TEMARIO

- ***CONTROL ESTADÍSTICO***
- ***CONTROL ÓPTIMO***
- ***CONTROL ADAPTATIVO***
- ***CONTROL PREDICTIVO***
- ***CONTROL ROBUSTO***

Control Estadístico (SPC)

- *La idea básica del SPC consiste en la aplicación de conceptos estadísticos para la determinación de si un proceso esta operando en régimen satisfactorio, o fuera de este. Por régimen satisfactorio entenderemos la región especificada por los límites máximo y mínimo que resultan aceptables para la calidad del producto.*

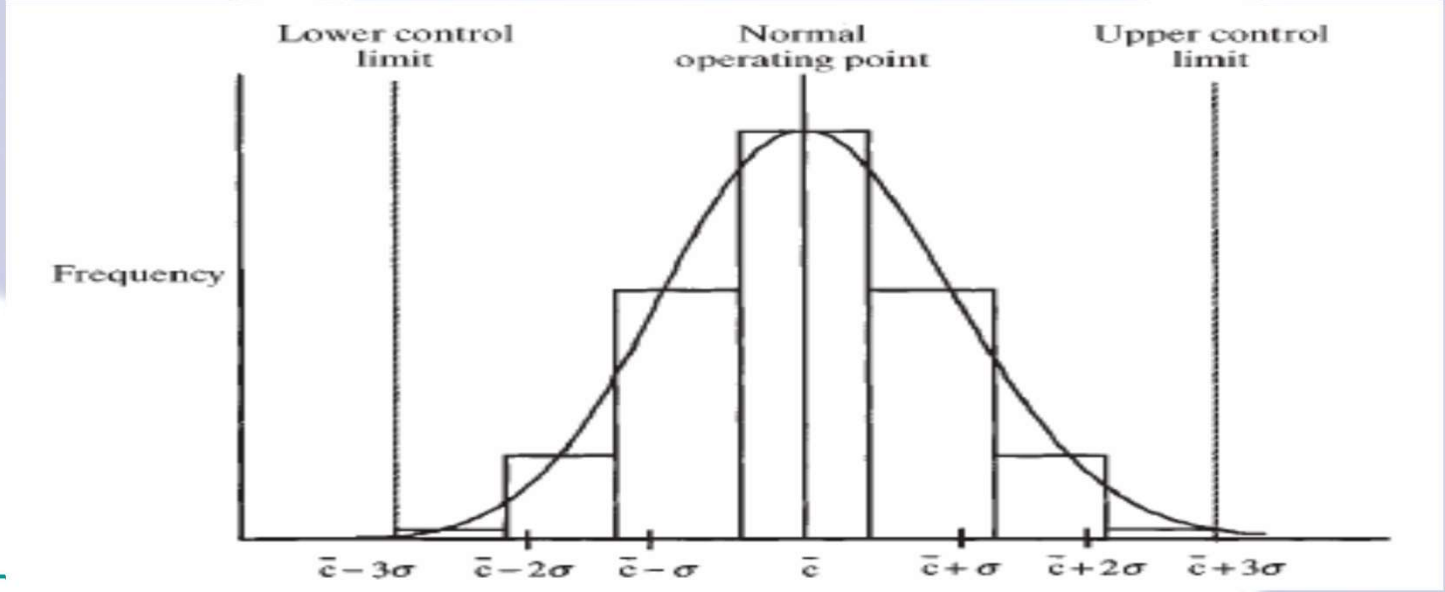
Control Estadístico (SPC)



- *Conocemos las estadísticas del ruido de la planta w(t) y del ruido de medición v(t) y deseamos determinar la mejor estimación del estado real x(t):* $\hat{x}(t)$ *, desde el conocimiento de z(t).*
- *La combinación de estos problemas dan origen al problema del control estadístico (SPC).*

Control Estadístico (SPC)

- *Generalmente la calidad del producto vendrá dada por una propiedad mensurable que puede representarse en un diagrama de frecuencias que tendrá la forma característica de la figura*



Control Estadístico (SPC)

- *La herramientas estadísticas comúnmente empleadas para la caracterización de la dispersión de la variable controlada son la media y la desviación*

$$\bar{c} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} c_i \qquad \sigma = \left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(c_i - \bar{c}\right)^2\right]^{1/2}$$

- *Cuando el proceso sigue una distribución normal, el 97% de los valores de la variable controlada caerán en el intervalo: .*

$$\left[\left(\bar{c} - 3\sigma\right), \left(\bar{c} + 3\sigma\right)\right]$$

Control Estadístico (SPC)

- *Cuando se cumple la condición anterior, se puede concluir que el proceso productivo no ha experimentado ninguna variación de tipo no aleatoria, y por consiguiente no es necesaria la aplicación de la acción de control (u otras medidas). Las fluctuaciones alrededor de la media (dentro de este intervalo) son parte de la variabilidad natural del proceso.*

- *Cuando se originan violaciones repetidas de los límites de especificación puede inferirse que el entorno del proceso ha cambiado y este por tanto se encuentra fuera de control.*

Control Estadístico (SPC)

- *Dentro de las razones por las cuales un proceso puede operar fuera de control se encuentran:*
  - *Perturbaciones persistentes en el tiempo.*
  - *Cambios no detectados en la especificación de la materia prima.*
  - *Funcionamiento incorrecto de componentes del sistema de control.*

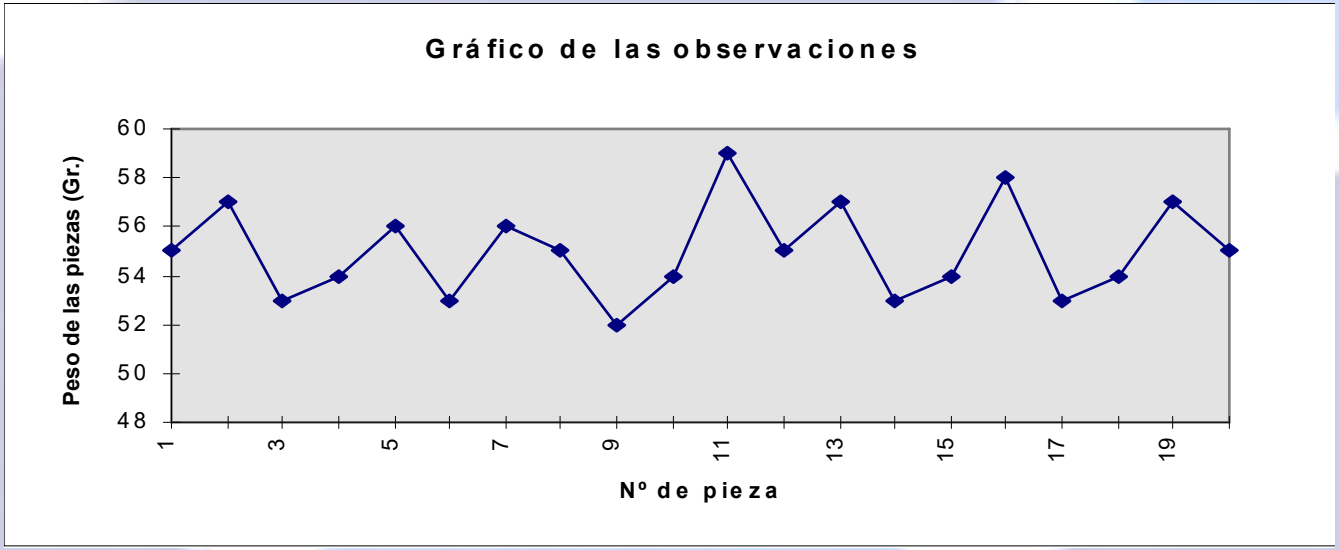
Control Estadístico (SPC)

- *En resumen SPC otorga un criterio para el establecimiento de la calidad del producto, sin embargo no identifica la fuente del problema o la acción correctora que debe realizarse.*

Control Estadístico (SPC)
¿Cómo Controlar?

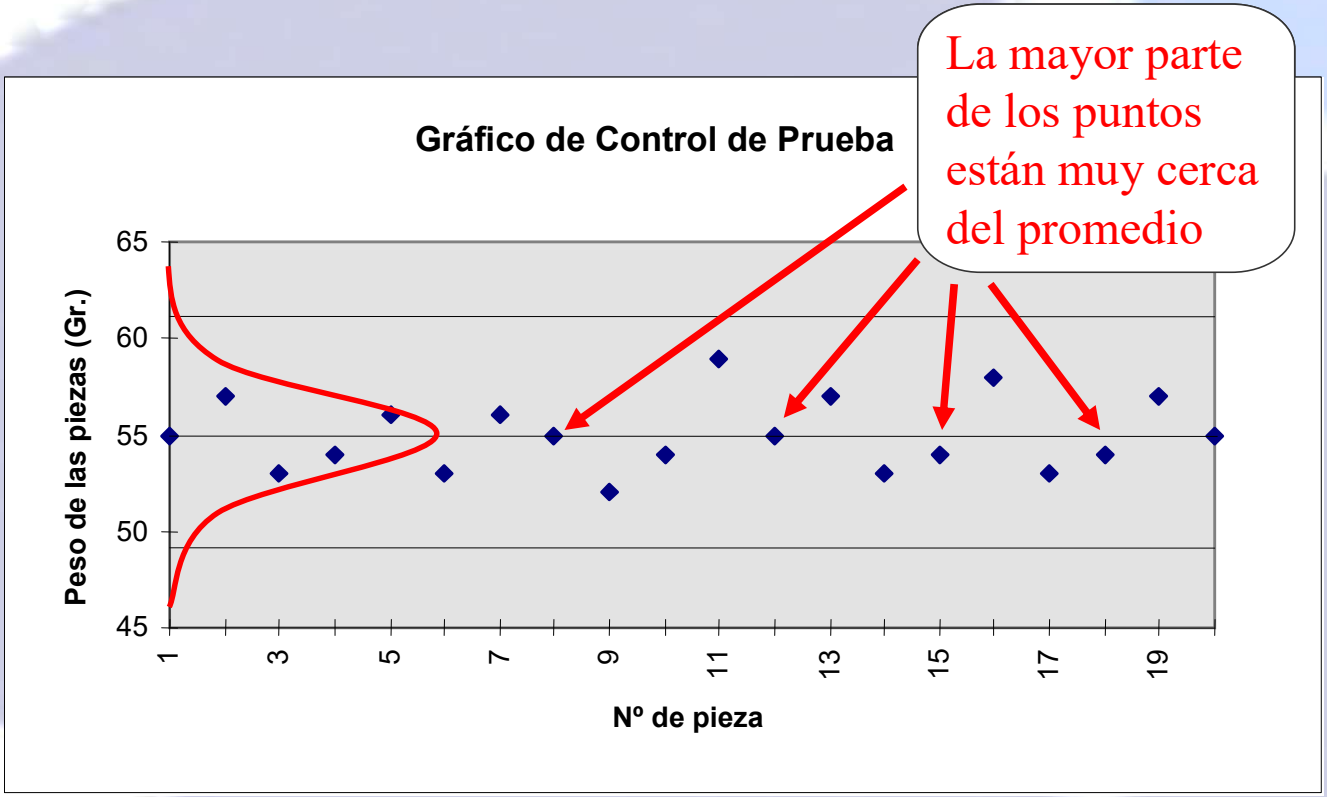
- *Gráficos de Control:*
  - *Los gráficos de control o cartas de control son una importante herramienta utilizada en control de calidad de procesos.*
  - *Básicamente, una Carta de Control es un gráfico en el cual se representan los valores de algún tipo de medición realizada durante el funcionamiento de un proceso continuo, y que sirve para controlar dicho proceso.*

Control Estadístico (SPC)
Gráficos de Control



Esta es la fluctuación esperable y natural del proceso. Los valores se mueven alrededor de un valor central (El promedio de los datos), la mayor parte del tiempo cerca del mismo.

Control Estadístico (SPC)
Gráficos de Control

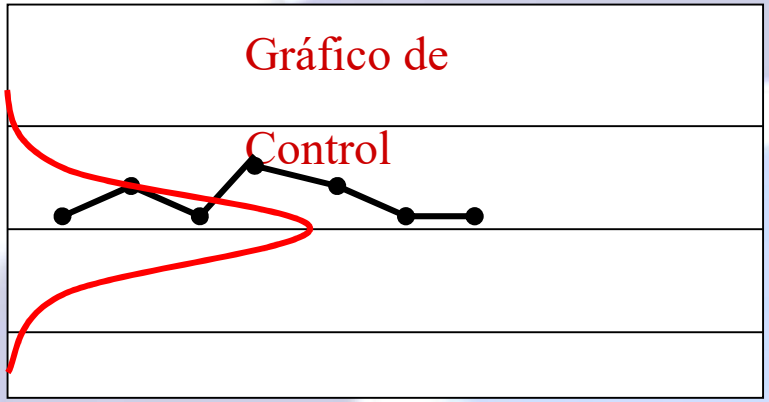


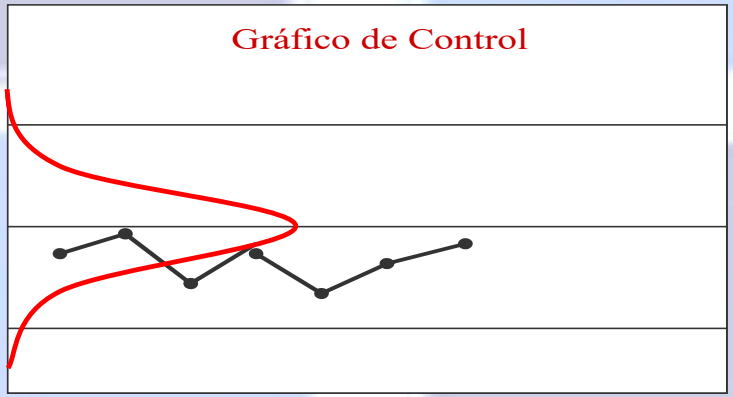
Control Estadístico (SPC)

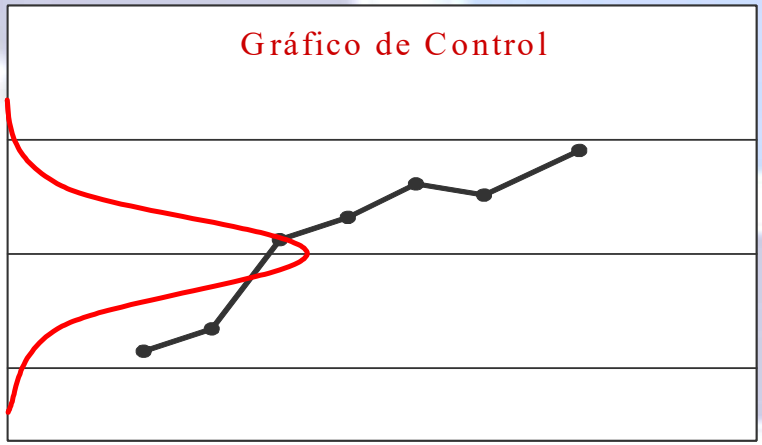
- *Para la identificación de comportamientos anómalos, o bien, cuando el proceso esta fuera de control se dispone del método (o reglas) de Western Electric. Los casos identificados como fuera de control son los siguientes:*

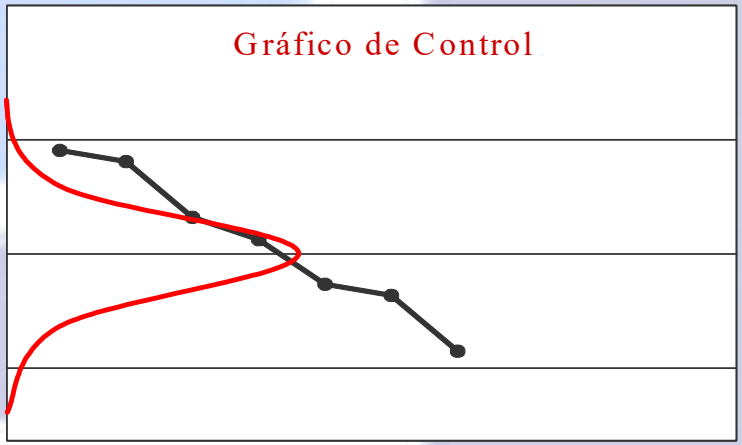
  - *Un punto fuera de los límites de especificación.*
  - *Siete puntos consecutivos situados en un mismo hemisferio de la media.*
  - *Siete puntos consecutivos de incremento o decremento.*
  - *Cualquier patrón no aleatorio.*

Control Estadístico (SPC)
Casos fuera de Control



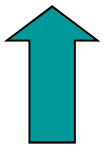






Control Estadístico (SPC)
Casos fuera de Control

- *Cuando las observaciones no siguen un patrón aleatorio, indicando la existencia de causas asignables, se hace necesario investigar para descubrirlas y eliminarlas.*
- *Una vez hecho esto, se deberán recoger nuevas observaciones y calcular nuevos límites de control de prueba, comenzando otra vez .*



Control Óptimo

- *La mayoría de los problemas de control de procesos de son de naturaleza compleja, lo que conduce a la formulación de la síntesis como un problema de optimización, lo cual hace posible el uso de herramientas matemática como el Cálculo Variacional.*
- *El resultado de este desarrollo ha sido la teoría del Control optimo. Esta teoría junto con la utilización de computadores digitales ha comprobado ser una herramienta exitosa de diseño.*

Control Óptimo

- *La teoría del control óptimo posee las siguientes características*
  - *No hace diferencia entre un problema de control a lazo abierto o a lazo cerrado.*
  - *La ley de control optimo es simplemente una función que mapea el espacio de las variables de estado x al espacio de las variables de control u. No existen elementos dinámicos en la realimentación óptima.*
  - *La información disponible para calcular de la señal de control u(t) no se introduce explícitamente cuando se formula y resuelve el problema de control.*

Control Óptimo

- *Sea el sistema:*

$$\dot{x}(t) = u$$

con $x(0) = 1.0$

Supongamos que se desea minimizar el índice de costo dado por :

$$J = \int_0^\infty [x^2(t) + u^2(t)]dt$$

Control Óptimo

- *Aplicando la ecuación de Lagrange:*

$$\phi = x^2(t) + u^2(t) + \lambda\{u(t) - \dot{x}(t)\}$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} - \frac{d}{dt}\frac{\partial \phi}{\partial \dot{x}} = 0 \Rightarrow \dot{\lambda} = -2x$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial u} - \frac{d}{dt}\frac{\partial \phi}{\partial \dot{u}} = 0 \Rightarrow \lambda = 2u$$

$$\dot{\lambda} = -2x$$

$$\lambda = -2u = -2\dot{x} \Rightarrow \ddot{x} + x = 0$$

$$\dot{\lambda} = -2\ddot{x}$$

Control Óptimo

Sea , con: x(0) = 1 $\Rightarrow$ *a = 1,0; Luego*

$$x(t) = e^{-t}$$

$$u(t) = \dot{x}(t) = -e^{-t}$$

$$u(t) = - x(t)$$

Control Óptimo

- *Cuando se introdujo la teoría del control optimo se produjo fuertes reacciones por el hecho de que no existía una diferencia entre el control de lazo abierto y lazo cerrado en el análisis. Por ejemplo, no fue posible obtener una estrategia de control que correspondiera el conocido PID. El corazón del problema es que no se usaron modelos realistas para las perturbaciones en la teoría del control óptimo.*

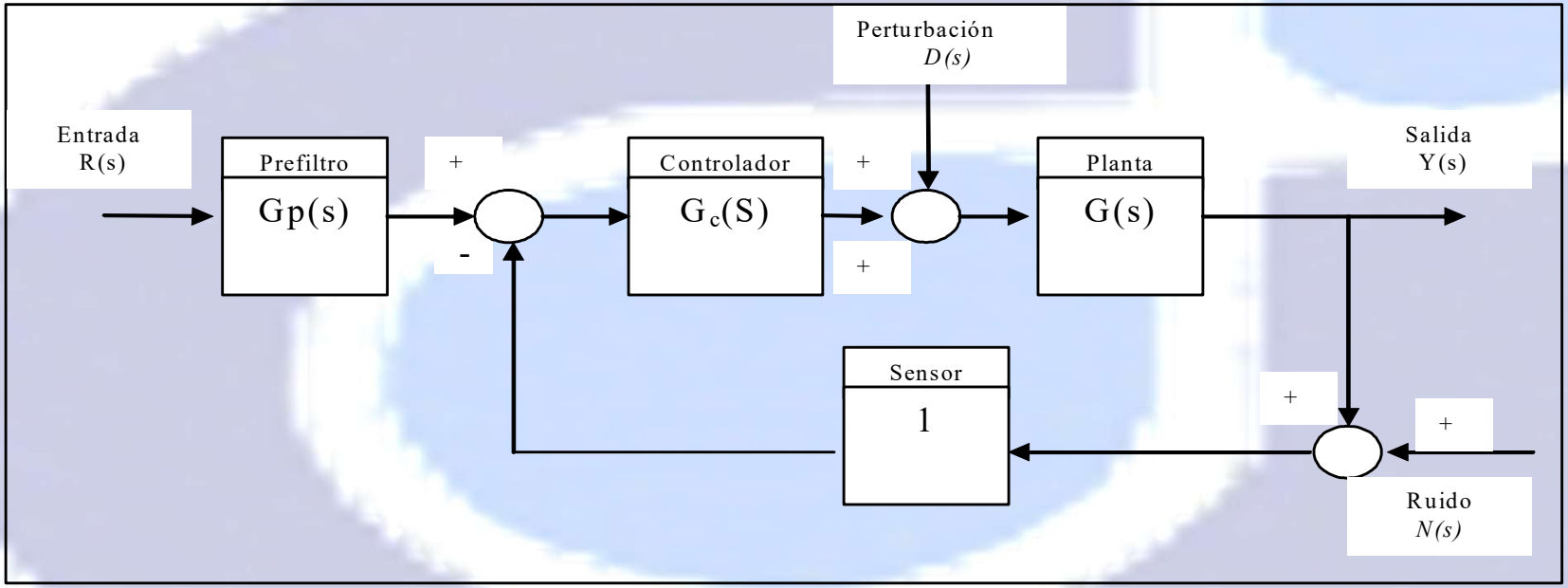
Control Robusto

- *Un sistema de control diseñado utilizando el conocimiento del modelo de la planta, del controlador y los parámetros constantes siempre será una representación imprecisa del sistema físico real a causa de*
  - *Cambios de parámetros*
  - *Dinámicas no modeladas*
  - *Retardos de tiempos no modelados*
  - *Cambios en el punto de equilibrio (punto de operación)*
  - *Ruido del sensor*
  - *Entrada de perturbaciones no predecibles*

Control Robusto

- *El objetivo del diseño de sistemas robustos es asegurar el comportamiento del sistema a pesar de las imprecisiones y cambios del modelo. Un sistema es robusto cuando tiene cambios aceptables en el comportamiento debido a cambios o imprecisiones del modelo*

Control Robusto



- *Un sistema de control es robusto cuando tiene sensibilidades pequeñas, es estable sobre el rango de variaciones de parámetros y el comportamiento continúa cumpliendo las especificaciones en presencia de un conjunto de cambios en los parámetros del sistema.*

Control Robusto

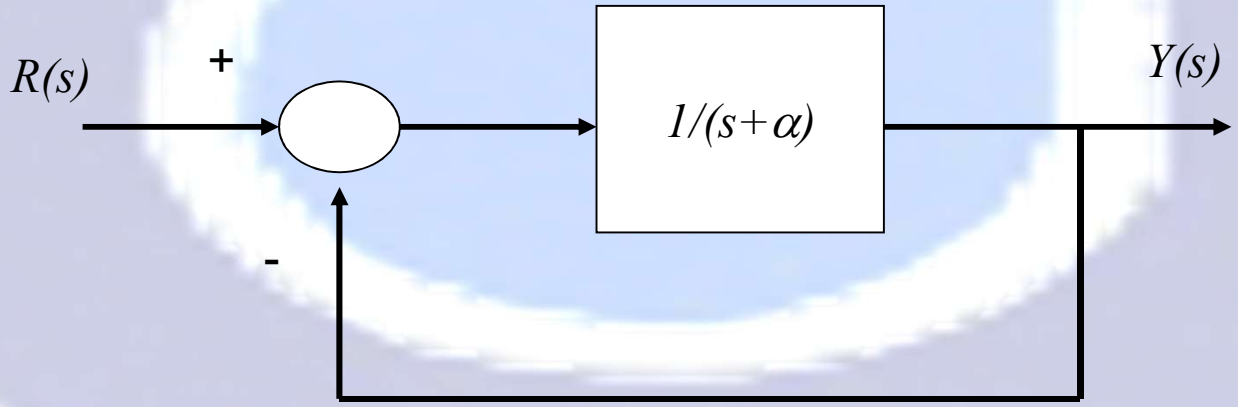
- *La sensibilidad del sistema se define como:*

$$S_{\alpha}^{T} = \frac{\partial T / T}{\partial \alpha / \alpha}$$

Donde α es el parámetro y T la función de transferencia del sistema

Control Robusto

- *Para un sistema de orden n. Por ejemplo, si se tiene un sistema en lazo cerrado tal como se muestra en la figura, donde el parámetro variable es α, entonces:*



$$T(s) = \frac{1}{s + (\alpha + 1)}$$

$$S_{\alpha}^{T} = \frac{-\alpha}{s + \alpha + 1}$$

Control Robusto

- *La robustez es la sensibilidad a efectos que no se consideran en la fase de análisis y de diseño, por ejemplo*
  - *Perturbaciones*
  - *Ruido de medida*
  - *Dinámicas no modeladas.*
- *El sistema deberá ser capaz de resistir estos efectos despreciados cuando realiza las tareas para las cuales fue diseñado.*

Control Robusto

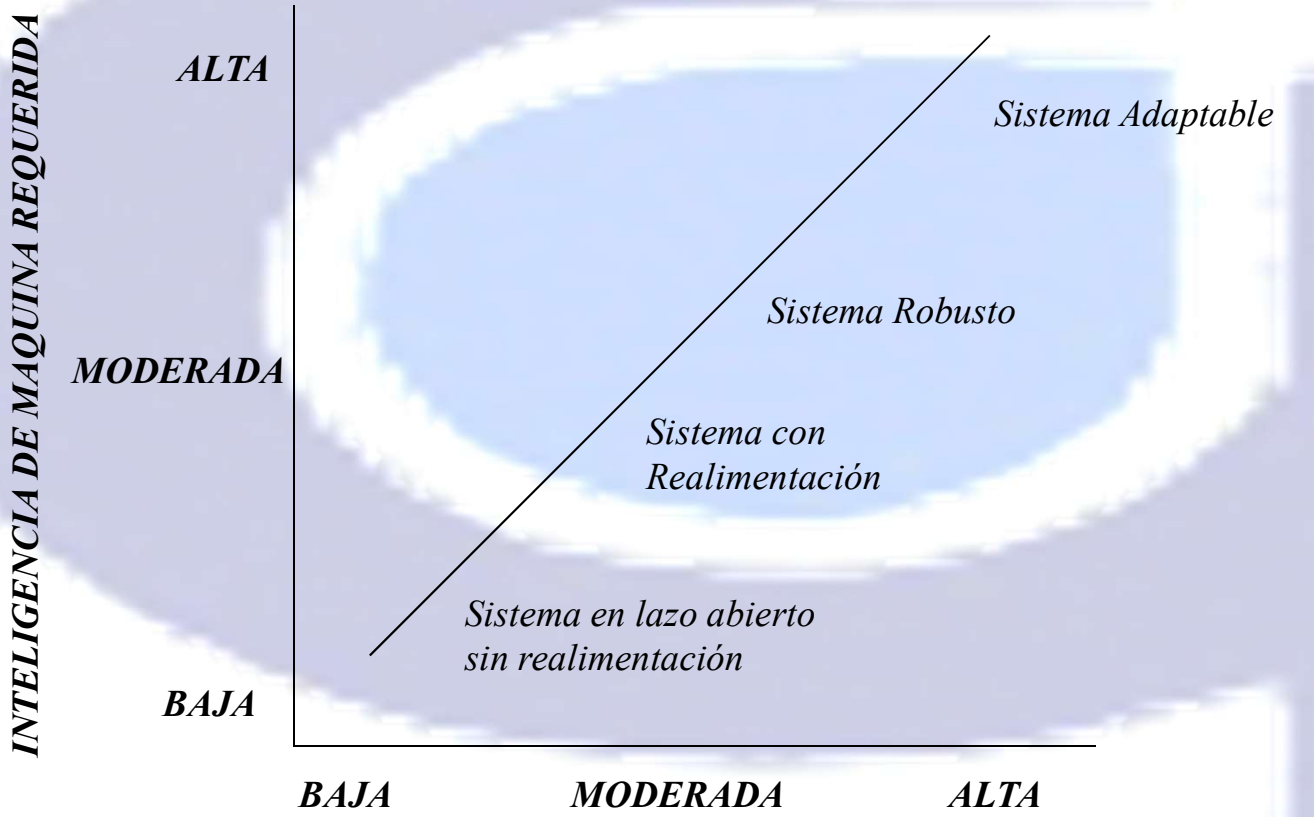
- *El diseño de sistemas de control robusto se basa en dos tareas:*
  - *Determinar la estructura del controlador*
  - *Ajustar sus parámetros para dar un comportamiento óptimo del sistema.*
- *Este proceso de diseño se hace normalmente con un asumido conocimiento completo de la planta*

Control Robusto

- *El diseño de sistemas de control altamente precisos en presencia de incertidumbre de planta significativa requiere que el diseñador busque un sistema de control robusto. Un sistema de control robusto muestra baja sensibilidad frente a cambios en los parámetros y es estable en un amplio rango de variaciones de parámetros.*

Control Robusto

- *Inteligencia requerida en función de la incertidumbre de los sistemas de control moderno*



Control Predictivo

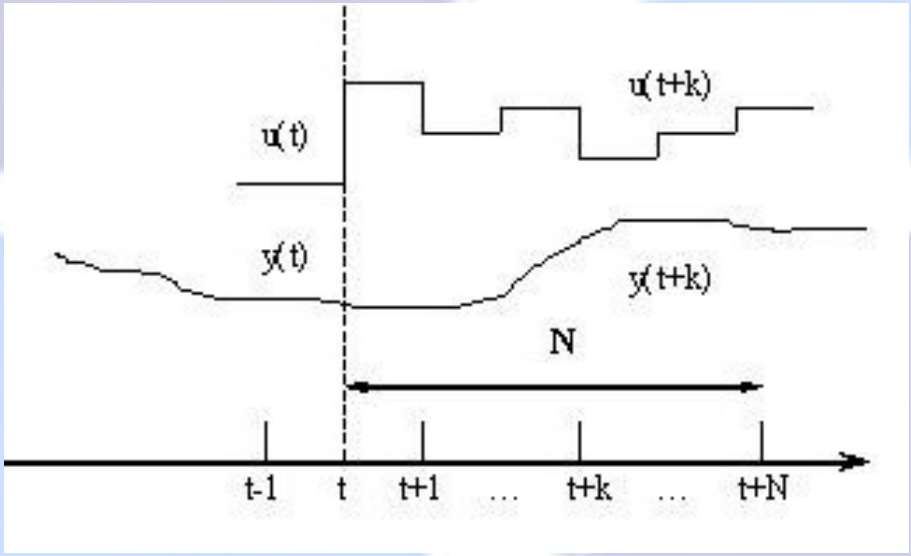
- *Originada en los años 70.*
- *Engloba diversas metodologías (DMC, MAC, PFC, EPSAC, EHAC, GPC, otras).*
- *Ventajas:*
  - ✓ *Fácil sintonización y características intuitivas.*
  - ✓ *Flexibilidad en la aplicación a diversos tipos de procesos.*
  - ✓ *Gran utilidad cuando se conocen futuras referencias del proceso.*
  - ✓ *Compatibilidad con otras estrategias de control.*

Control Predictivo

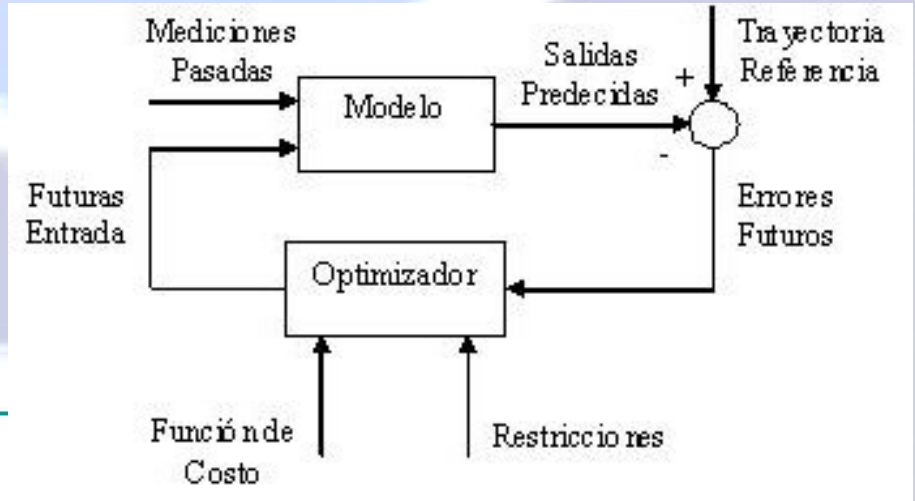
- *Desventajas:*
  - ✓ *Derivación de la ley de control.*
  - ✓ *Modelo del proceso.*
- *Metodología:*
  - ✓ *Predicción de las futuras salidas del proceso, mediante mediciones de las variables I/O, y futuras señales de control.*
  - ✓ *Cálculo de la señal de control futura, mediante optimización de una función objetivo, para mantener al proceso dentro de una trayectoria de referencia.*
  - ✓ *Envío de la señal de control y actualización de los cálculos debido a la nueva información disponible.*

Control Predictivo

Horizonte de
Predicción y variables del proceso



Implementación
de la estrategia MPC.



Control Predictivo

- *Elementos Principales del MPC:*
  - ✓ *Modelo de Predicción.*

  (Modelo del proceso + Modelo para las perturbaciones)
  - ✓ *Función Objetivo.*

  (c/s Restricciones)
  - ✓ *Ley de Control.*

  (Minimización de Función Objetivo)

Control Predictivo
Modelo de Predicción

Modelo del Proceso.

Modelo de impulso respuesta:

$$y(t) = \sum_{i=1}^{N} h_i u(t-i) = H(z^{-1})u(t)$$

Predicción:

$$H(z^{-1}) = h_1 z^{-1} + h_2 z^{-2} + \ldots + h_N z^{-N}$$

Extensión MIMO

$$y(t+k)\big|_t = \sum_{i=1}^{N} h_i u(t+k-i)\big|_t = H(z^{-1})u(t+k)\big|_t$$

$$y_j(t) = \sum_{k=1}^{m}\sum_{i=1}^{N} h_i^{kj} u^k(t-i)$$

Control Predictivo
Modelo de Predicción

Modelo de Respuesta en Escalón:

$$y(t) = y_0 + \sum_{i=1}^{N} g_i \Delta u(t-i) = y_0 + G(z^{-1})(1-z^{-1})u(t)$$

$$\Delta u(t) = u(t) - u(t-1)$$

Predicción:

$$y(t+k)\big|_t = \sum_{i=1}^{N} g_i \Delta u(t+k-i)\big|_t$$

Ventajas:

- *No requiere información previa del proceso.*
- *Modelar dinámicas complejas.*

Desventajas:

- *Alto número de parámetros (N = 40 a 50).*

Control Predictivo
Modelo de Predicción

Función de Transferencia:

$$A(z^{-1})y(t) = B(z^{-1})u(t)$$

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \ldots + a_{na} z^{-na} \qquad B(z^{-1}) = b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \ldots + b_{nb} z^{-nb}$$

Predicción:

$$y(t+k)\big|_t = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} u(t+k)\Big|_t$$

Ventajas:

- ✓ *Aceptación en la industria e investigación.*
- ✓ *Fácil manejo de tiempo muerto.*
- ✓ *Pocos parámetros.*

Desventajas:

- ✓ *Requiere conocimiento previo del proceso.*
- ✓ *Ley de control difícil de derivar.*

Control Predictivo
Modelo de Predicción

Espacio de estado:

$$x(t) = Ax(t-1) + Bu(t-1)$$

$$y(t) = Cx(t)$$

Predicción:

$$y(t+k)\big|_t = Cx(t+k)\big|_t = C\left[A^k x(t) + \sum_{i=1}^{k} A^{i-1} Bu(t+k-i)\big|_t\right]$$

Ventajas:

- ✓ *Fácil implementación para sistemas MIMO.*

Desventajas:

- ✓ *Ley de control difícil de derivar.*

Control Predictivo
Modelo de Predicción

Otros modelos:

- *Redes Neuronales.*
- *Fuzzy Logic.*

Desventaja:

Complican el problema de optimización.

Control Predictivo
Modelo de Predicción

Modelo para las Perturbaciones.

Modelo CARIMA (Controlled Auto-Regressive and Integrated Moving Average):

$$n(t) = \frac{C(z^{-1})}{D(z^{-1})} e(t)$$

$$n(t)\Big|_t = y_m(t) - y(t)\Big|_t$$

Control Predictivo
Función Objetivo

Forma General:

$$J(N_1, N_2, N_u) = \sum_{j=N_1}^{N_2} \delta(j)\left[y(t+j)\big|_t - w(t+j)\right]^2 + \sum_{j=1}^{N_u} \lambda(j)\left[\Delta u(t+j-1)\big|_t\right]^2$$

Trayectoria de referencia:

$$w(t) = y(t)$$

$$w(t+k) = \alpha w(t+k-1) + (1-\alpha) r(t+k) \qquad w(t+k) = r(t+k) - \alpha^k (y(t) - r(t))$$

Restricciones:

$$k = 1 \ldots N \qquad 0 \le \alpha \le 1$$

$$u_{\min} \le u \le u_{\max} \qquad du_{\min} \le u(t) - u(t-1) \le du_{\max}$$

$$y_{\min} \le y \le y_{\max} \quad \forall t$$

Control Predictivo
Ley de Control

- *Obtención de los valores futuros de la señal de control mediante minimización de la función objetivo.*
- *Solución analítica para optimización para modelo lineal y sin restricciones.*
- *Otros casos se aplican técnicas iterativas.*
- *Estructuración de la ley de control:*
  - ✓ *Variación constante de la señal de control:*

$$N_u < N_2 \quad \Delta u(t+j-1) = 0 \quad j > N_u$$

  - ✓ *Empleo de Funciones Base:*

$$u(t+k) = \sum_{i=1}^{n} \mu_i(t) B_i(k) \qquad B_i(k) = k^i$$

Control Predictivo
Principales Algoritmos MPC

- *Dynamic Matrix Control, DMC:*
  - ✓ *Modelo de respuesta en escalón.*
  - ✓ *Perturbaciones Constantes.* $n(t+k)\big|_t = n(t)\big|_t = y_m(t) - y(t)\big|_t$
  - ✓ *Incluye restricciones.*

$$\sum_{i=1}^{N}\left[C_{yi}^{j}\, y(t+k)\big|_t + C_{ui}^{j}\, u(t+k-i)\right] + c^{j} \le 0$$

  - ✓ *Predicción.*

$$y(t+k)\big|_t = \sum_{i=1}^{k} g_i \Delta u(t+k-i) + \sum_{i=k+1}^{N} g_i \Delta u(t+k-i) + n(t+k)\big|_t$$

  - ✓ *Optimización Numérica.*
  - ✓ *Desventajas: Tamaño del modelo requerido y no puede trabajar con procesos inestables*

Control Predictivo
Principales Algoritmos MPC

- *Model Algorithmic Control, MAC:*
  - ✓ *Modelo Impulso Respuesta.*
  - ✓ *Trayectoria de referencia de 1º orden.*
  - ✓ *No considera la penalización de los esfuerzos de control.*
  - ✓ *Perturbaciones tratadas como en DMC, ó estimación recursiva.*

$$n(t+k)\big|_t = \alpha n(t+k-1)\big|_t + (1-\alpha)(y_m(t) - y(t)\big|_t)$$

$$n(t)\big|_t = 0$$

Control Predictivo
Principales Algoritmos MPC

- *Predictive Functional Control, PFC:*
  - ✓ *Modelo de Espacio de Estado.*
  - ✓ *Empleo de puntos de coincidencia y funciones base.*
  - ✓ *Trayectoria de referencia de 1º orden.*
  - ✓ *Sin penalizaciones por esfuerzo de control.*
  - ✓ *Ventaja: Permite trabajar con procesos inestables y no lineales.*

Control Predictivo
Principales Algoritmos MPC

- *Extended Prediction Self Adaptive Control, EPSAC:*
  - *Modelo de Función de Transferencia con retraso.*

$$A(z^{-1})y(t) = B(z^{-1})u(t-d) + v(t)$$

  - *Señal de control constante a partir de t.*
  - *Sin penalización por esfuerzo de control.*
  - *Determinación analítica de la señal de control.*

$$u(t) = \frac{\sum_{k=d}^{N} h_k \gamma(k)\left[w(t+k) - P(z^{-1})y(t+k)\Big|_t\right]}{\sum_{k=d}^{N} \gamma(k) h_k^2}$$

Control Predictivo
Principales Algoritmos MPC

- *Extended Horizon Adaptive Control, EHAC.*
  - ✓ *Modelo de función de Transferencia con Retraso.*

$$A(z^{-1})y(t) = B(z^{-1})u(t-d)$$

  - ✓ *Minimiza la diferencia entre el modelo y la referencia en el instante $t+N$.*
  - ✓ *Predictor.*

$$y(t+N)\big|_t = y(t) + F(z^{-1})\Delta y(t) + E(z^{-1})B(z^{-1})\Delta u(t+N-d)$$

  - ✓ *Solución explícita de la ley de control.*

$$(1-z^{-1}) = A(z^{-1})E(z^{-1})(1-z^{-1}) + z^{-N}F(z^{-1})(1-z^{-1})$$

$$u(t) = u(t-1) + \frac{\alpha_0\left(w(t+N) - y(t+N)\big|_t\right)}{\sum_{k=0}^{N-d}\alpha_k^2}$$

Control Predictivo
Principales Algoritmos MPC

- *Generalized Predictive Control, GPC:*
  - *Modelo Función de Transferencia y CARIMA.*
  - *Optimización con pesos constantes o exponenciales crecientes.*
  - *Trayectoria de referencia exponencial recursiva.*

Control Adaptativo

- *Cambios significativos en las condiciones del entorno.*
  - *Condiciones ambientales variables.*
  - *Cambios en los parámetros de la planta.*
  - *Cambios en las señales de entradas.*
  - *Perturbaciones.*
  - *Cambios de objetivos de performance.*
- *Punto óptimo de operación.*
- *Sintonía del controlador.*

Control Adaptativo

- *Controlador Adaptativo pre-programado.*
  - ✓ *Cambios en las condiciones ambientales conocidos.*
  - ✓ *Set de óptimos parámetros del controlador programados en el tiempo.*

Control Adaptativo

¿Que sucede con los cambios no correlacionables y/o no completamente predecibles?.

Índice de Performance (IP)

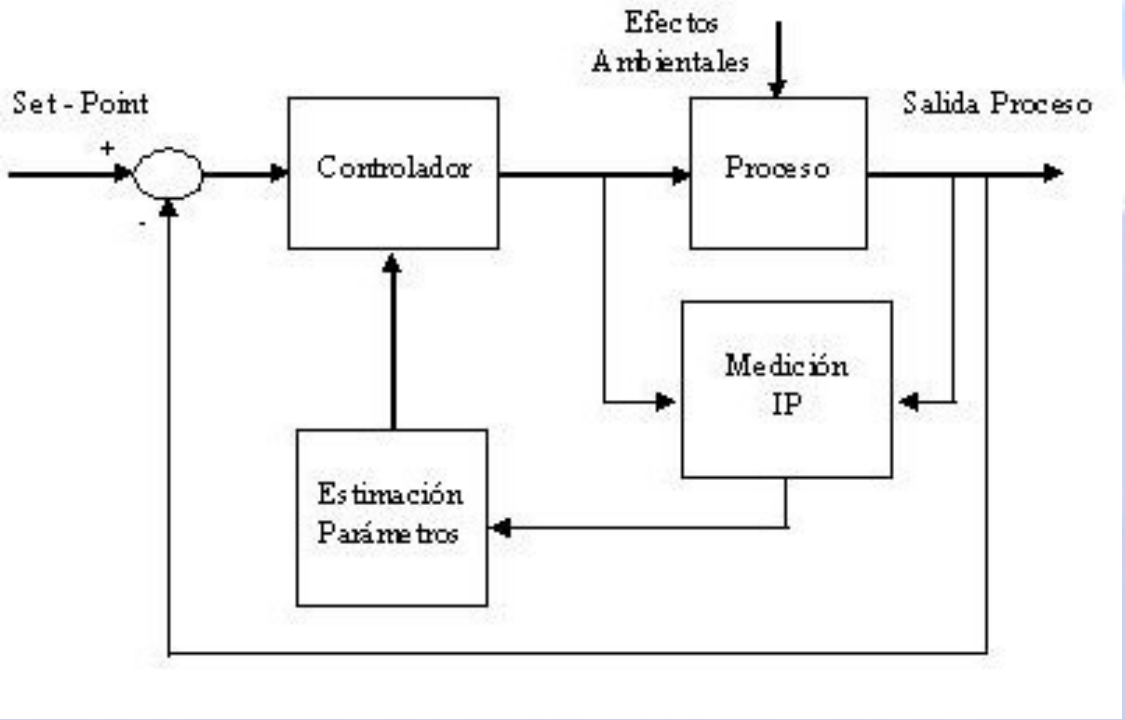
+

Lazo de control

Lazo de Control Adaptativo

"Sistema que mide que mide su desempeño, en base a un IP y modifica sus parametros para aproximarse al óptimo"

Control Adaptativo



Esquema Estrategia Sistema de Control Adaptativo

Control Adaptativo

- *Constitución del Controlador Adaptable.*
  - ✓ *Identificación.*

  (Caracterización del Sistema + medición IP)
  - ✓ *Decisión.*

  (Relación de la performance del sistema con el óptimo)
  - ✓ *Modificación.*

  (Cambio de los parámetros del sistema, Cambios en la señal de entrada).

Control Adaptativo

- *Clasificaciones de esquemas de Control Adaptativos.*
  - *Cantidad de Parámetros ajustables.*
  - *En base a su IP (Dynamic, Static, odd/even function).*
  - *Forma de Adaptación (Programada, Auto-Adaptable).*
  - *Lazo de Control Adaptativo (OLAC, CLAC).*
  - *Compensación de cambios.*

Control Adaptativo

Ejemplos de Controladores Adaptativos Industriales

Fabricante	**Controlador**	*Gain Scheduling*	*Self – Tuning*	
			Feedback	*Feedforward*
Bailey Controls	CLC 04	Si	*Model – Based*	-
Control Techniques	Expert controller	-	*Model – Based*	-
Fisher Controls	DPR900	Si	-	-
	DPR910	Si	*Model – Based*	*Model – Based*
Foxboro	Exact	-	*Rule – Based*	-
Fuji	CC-S PNA 3	Si	-	-
Hartmann& Braun	Protonic P	-	-	-
	Digitric P	-	-	-
Honeywell	UDC 6000	Si	*Rule – Based*	-
Satt Control	ECA40	Si	-	-
	ECA400	SI	*Model – Based*	*Model – Based*
Siemens	SIPART DR22	Si	-	-
Toshiba	TOSDIC-215D	Si	*Model – Based*	-
	EC300	Si	*Model – Based*	-
Turnbull Control Systems	TCS 6355	-	*Model – Based*	-
Yokogawa	SLPC-171,271	Si	*Rule – Based*	-
	SLPC-181,281	Si	*Model – Based*	-

FIN