



---

# Introducción al Control Predictivo basado en modelos MPC

Prof. Cesar de Prada

Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática

Universidad de Valladolid, España

e-mail: [prada@autom.uva.es](mailto:prada@autom.uva.es)



# Valladolid



Valladolid-  
Madrid 1 h.

- Capital of Castilla-León
- Industria automovil, Renault



Miguel de Cervantes  
“El Quijote”



Cristobal Colón



# Universidad de Valladolid

---

- ✓ Segunda mas antigua de España ( siglo XIII )
- ✓ Todas las ramas: Humanidades, Derecho, Ingeniería, Medicina, ...
- ✓ 26000 estudiantes



Palacio de Santa Cruz  
Siglo XV

Sede del Rectorado



# “Supervisión y Control de Procesos”

## Grupo reconocido de investigación



2 Catedráticos  
5 Titulares  
3 contratados doctores  
12 becarios investigación  
2 técnicos

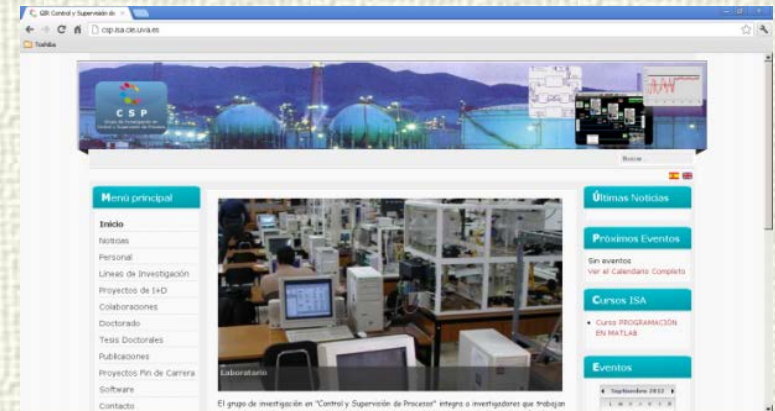


Sede Mergelina

Desarrollar  
nuevas ideas y  
teoría

Desarrollar  
software

Aplicaciones  
industriales



Web: [csp.isa.cie.uva.es](http://csp.isa.cie.uva.es)



# Temas de investigación



Detección y diagnóstico de fallos

Hybridos / Incertidumbre

Control Avanzado, MPC

Optimización de Procesos

Modelado y Simulación





# Relaciones industriales / Internacionales



CTA (Centro de Tecnología Azucarera) centro conjunto con la industria azucarera



Simuladores de planta completa  
Optimización de procesos



Repsol-  
YPF



CERN  
LHC



Intergeo Tec.  
ENAGAS

Redes:

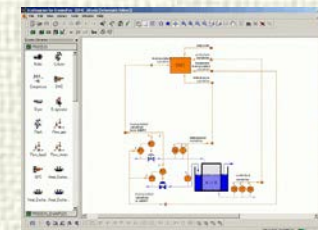
EU

CITED

ALFA

European Embedded Control  
Institute (EECI)

Associated unit  
CSIC



Empresarios  
Agrupados  
EcosimPro



# Introducción al MPC

Curso Introducción al Control Predictivo de procesos, MPC

Sesión	Viernes	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves
	Introducción al MPC Modelos	Práctica MPC	Estabilidad	Optimización dinámica, EMPC	MPC Híbrido, MPC distribuido
	MPC lineal, Offset	NMPC	RTO	Robustez, MPC Estocástico	Software Aplicaciones



# Tendencias en la industria

---

- ✓ Exigencias crecientes de optimización de costos, mejor calidad, productividad, seguridad, respeto al medio ambiente, funcionamiento de las plantas en un amplio rango de condiciones de operación,...

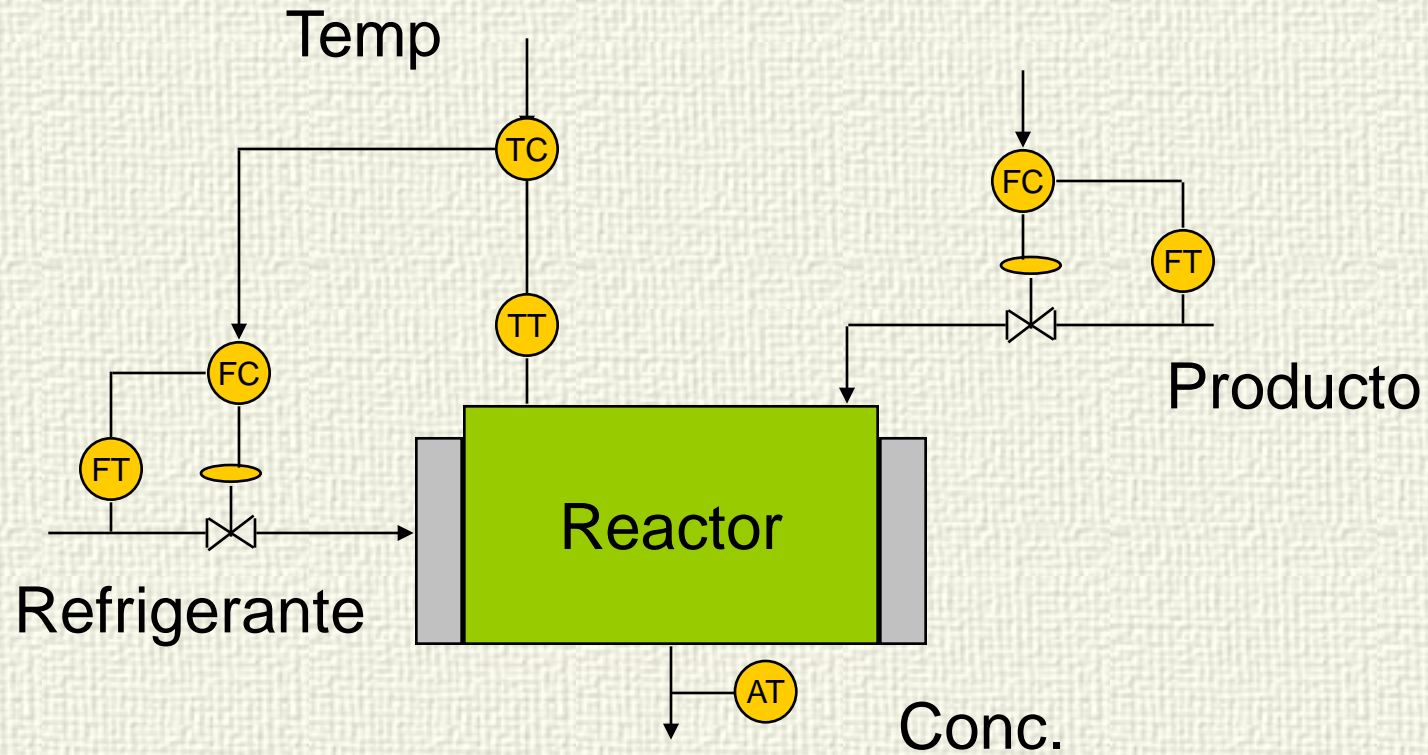


- ✓ Requiere una mejora de los sistemas de control para cumplir especificaciones.
- ✓ Necesidad de racionalizar las decisiones de nivel superior con significado económico y de integrar todas las decisiones a diversos niveles.





# Mejorar / Integrar





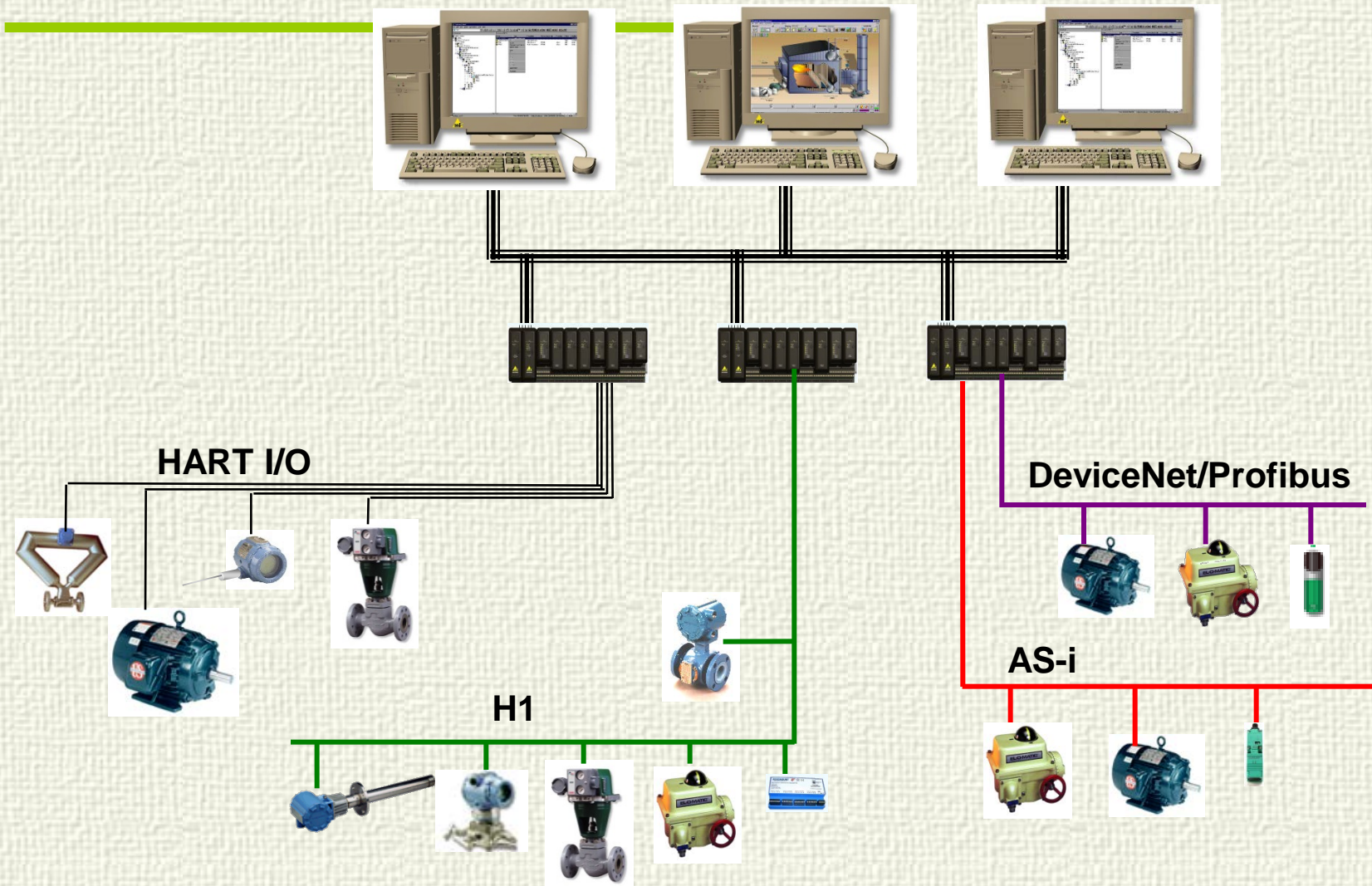
# Cambios Tecnológicos

---

- ✓ Hardware mas potente
- ✓ Redes de comunicación
- ✓ Mejoras en la instrumentación
- ✓ Sistemas abiertos y estándares
- ✓ Mejoras en el software y herramientas de cálculo
- ✓ Nuevos desarrollos en métodos y teoría



# Hardware / Arquitecturas





# Instrumentación inteligente

**Valve Signature - 83-UV-0710**

Tag Network Instrument Setup Calibration Diagnostics Spec Sheet Tools Customize ValveLink Help

ValveLink VL2000 Revision B455

- HART Modem 1
- Database
  - (unassigned)
    - HART 83-PV-0711
    - HART 83-UV-0710
    - HART FCV-101

Datasets: 09 Feb 2001 13:27:13 Save Test Spec Sheet

Inputs Configuration Graph Data Points Analyzed Notes Valve Trim Actuator Reference



Actuator Pressure (psi)

Travel (deg)

X: -32.81  
Y: 69.86

View Full Screen Zoom Out Zoom Back Add Overlay

Run Diagnostic Save Dataset Delete Dataset Close Tag Help

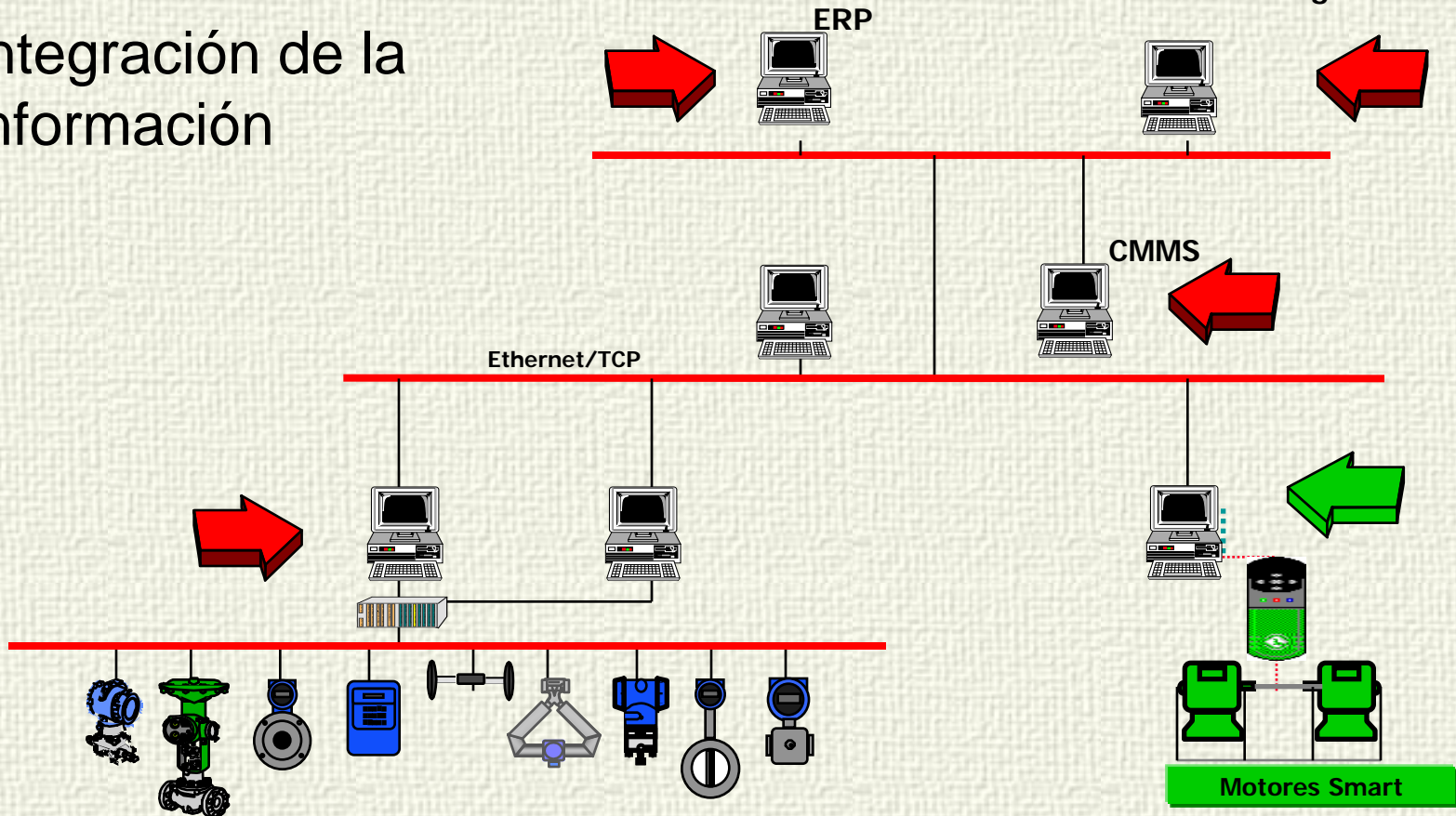




# Sistemas de Información

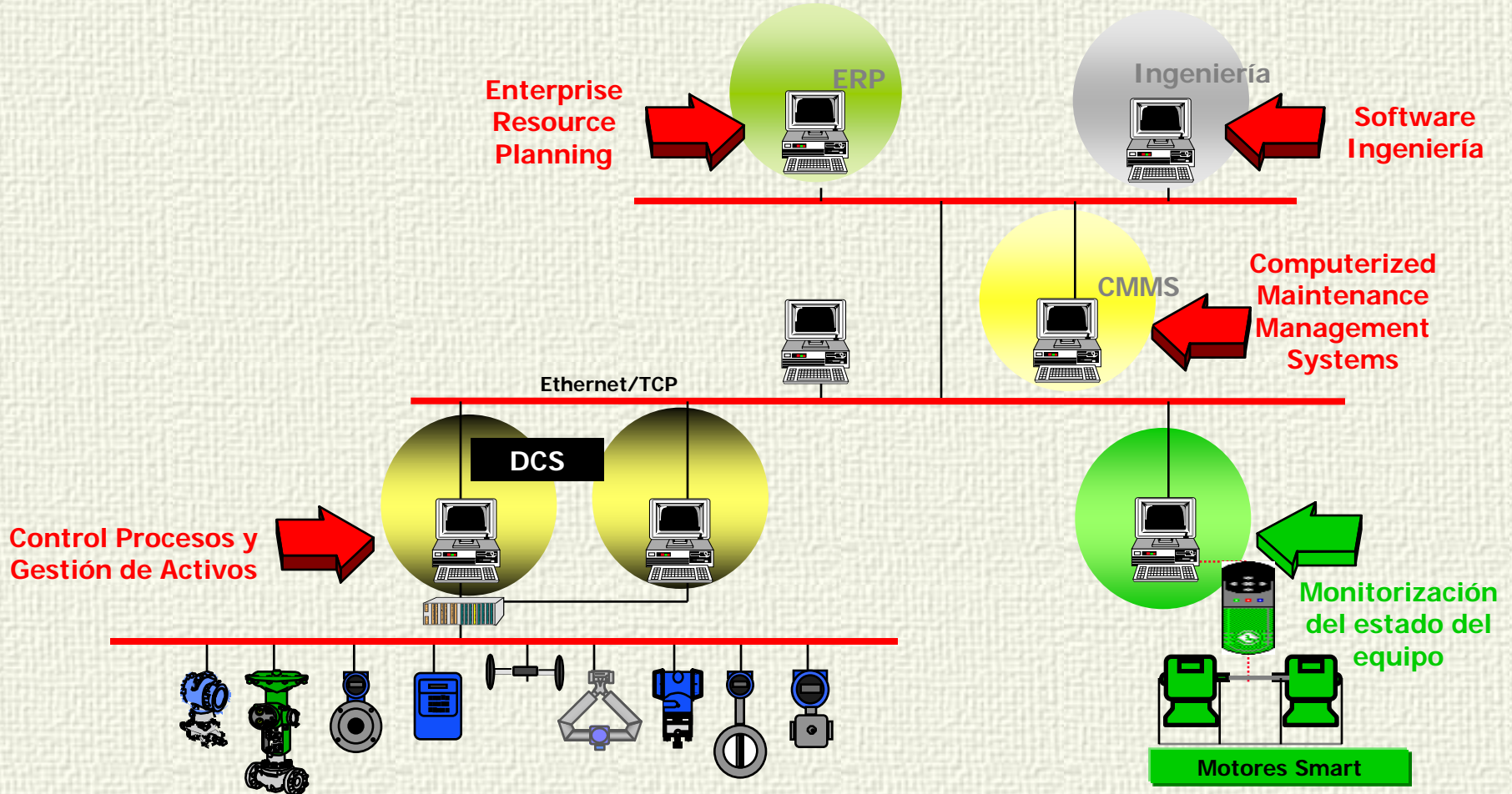
Integración de la información

Ingeniería



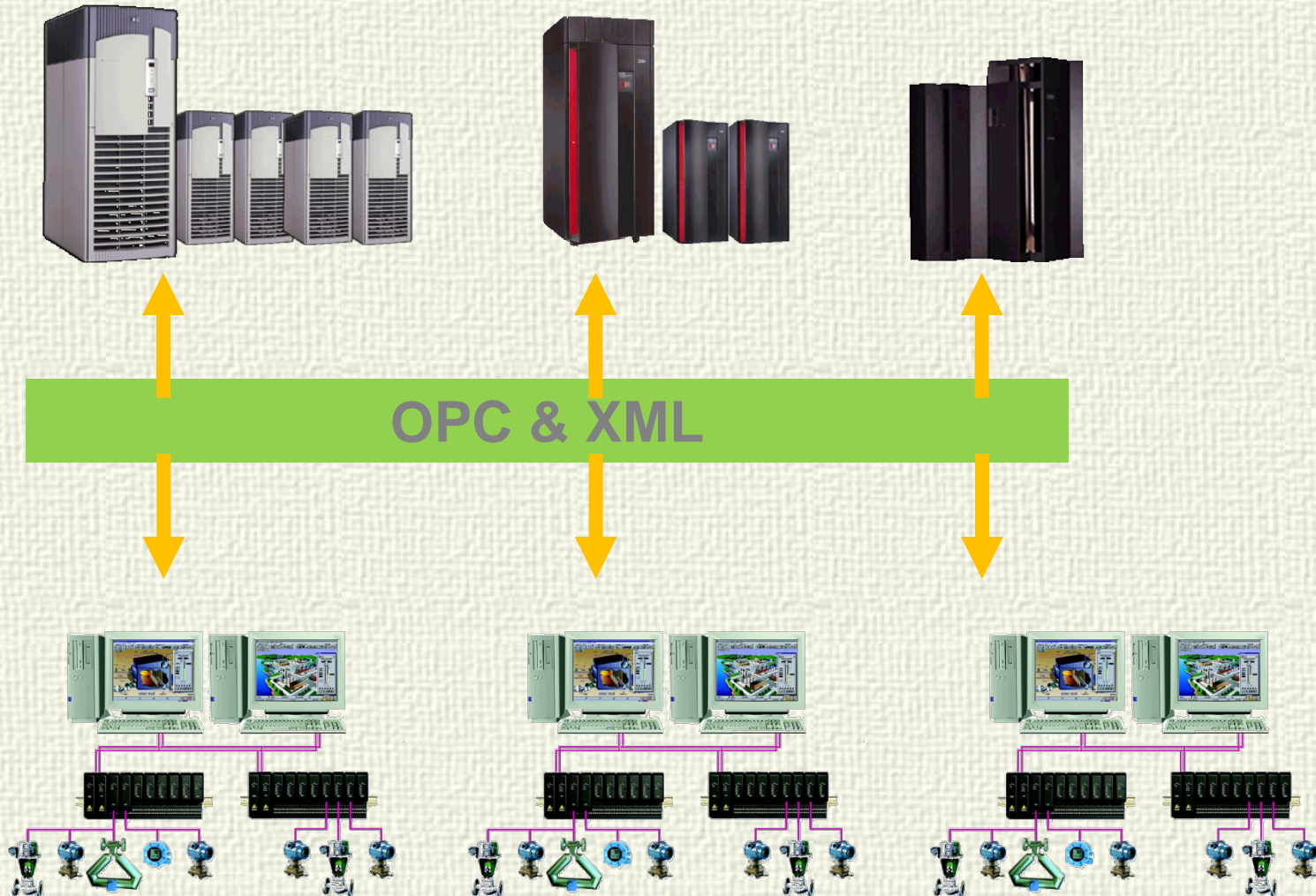


# Cooperación / Uso de información



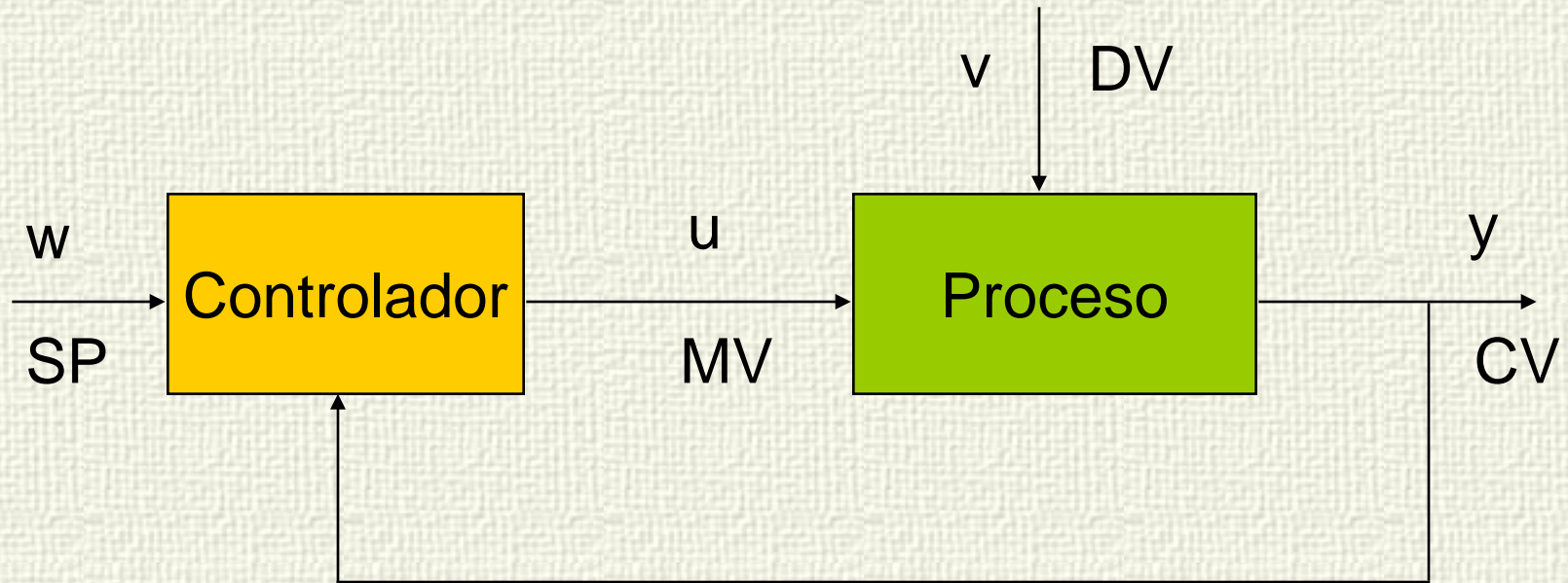


# Estandares / Sistemas abiertos





# Lazos de regulación



La mayoría de los lazos de regulación implementan reguladores PID





# EL REGULADOR PID

---

$$e(t) = w(t) - y(t)$$

$$u(t) = K_p \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(\tau) d\tau + T_d \frac{de}{dt} \right)$$

- ✓ **regulador basado en señal**, no incorpora conocimiento explícito del proceso
- ✓ 3 parámetros de sintonía  $K_p$ ,  $T_i$ ,  $T_d$
- ✓ diversas modificaciones según los fabricantes
- ✓ Una entrada / una salida



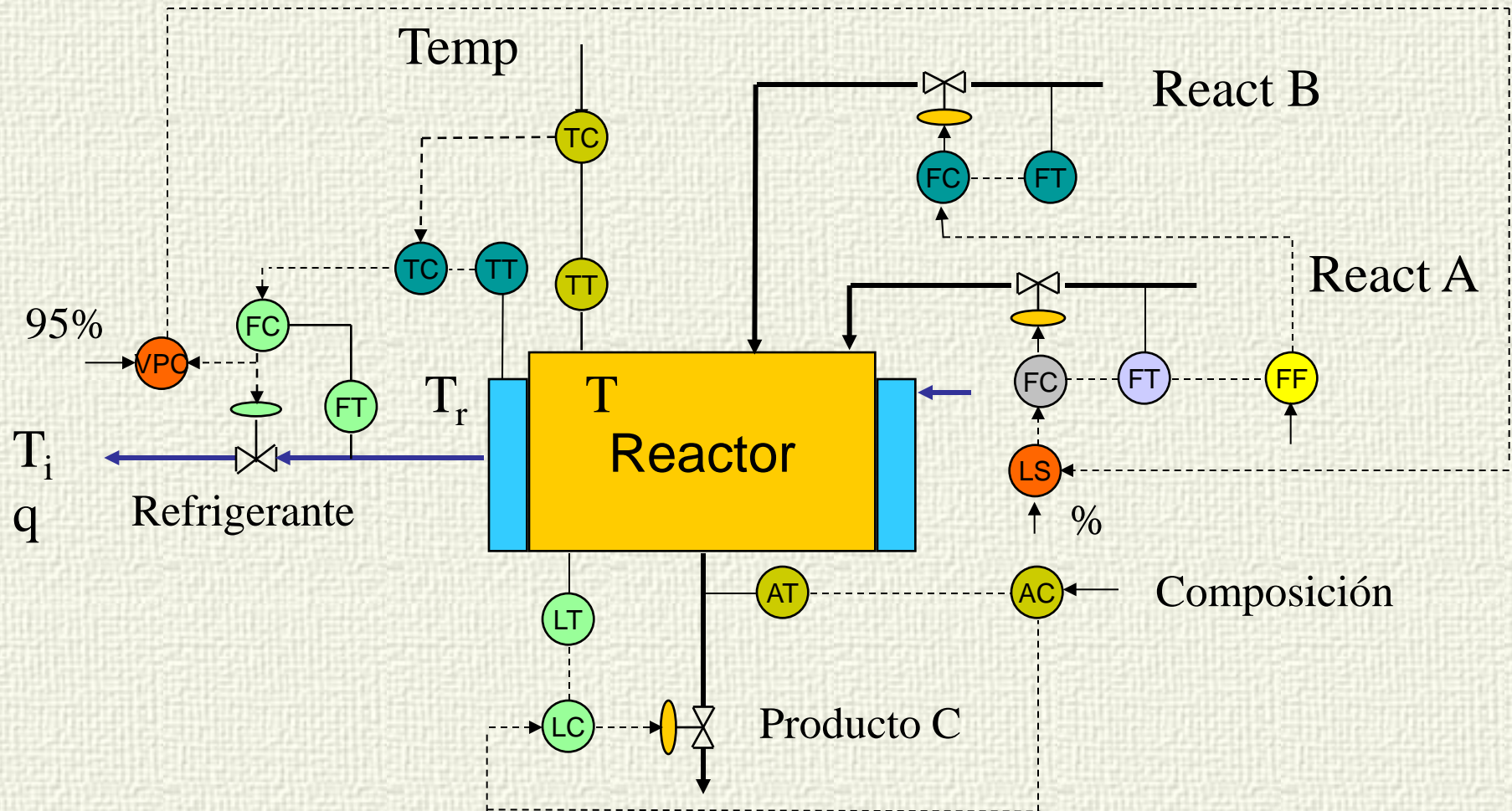
# Técnicas de Control

---

- ✓ En la industria de procesos, los reguladores PID solucionan bien la mayoría de los problemas de control monovariable (caudal, presión,...)
- ✓ En sistemas mas complejos con interacción entre variables, límites en el valor de otras, perturbaciones, etc. se recurre a estructuras de control complicadas implementadas en los sistemas de control por ordenador
  - Difíciles de mantener.
  - En muchas ocasiones no tienen comportamientos suficientemente buenos.



# Interacción / multivariables

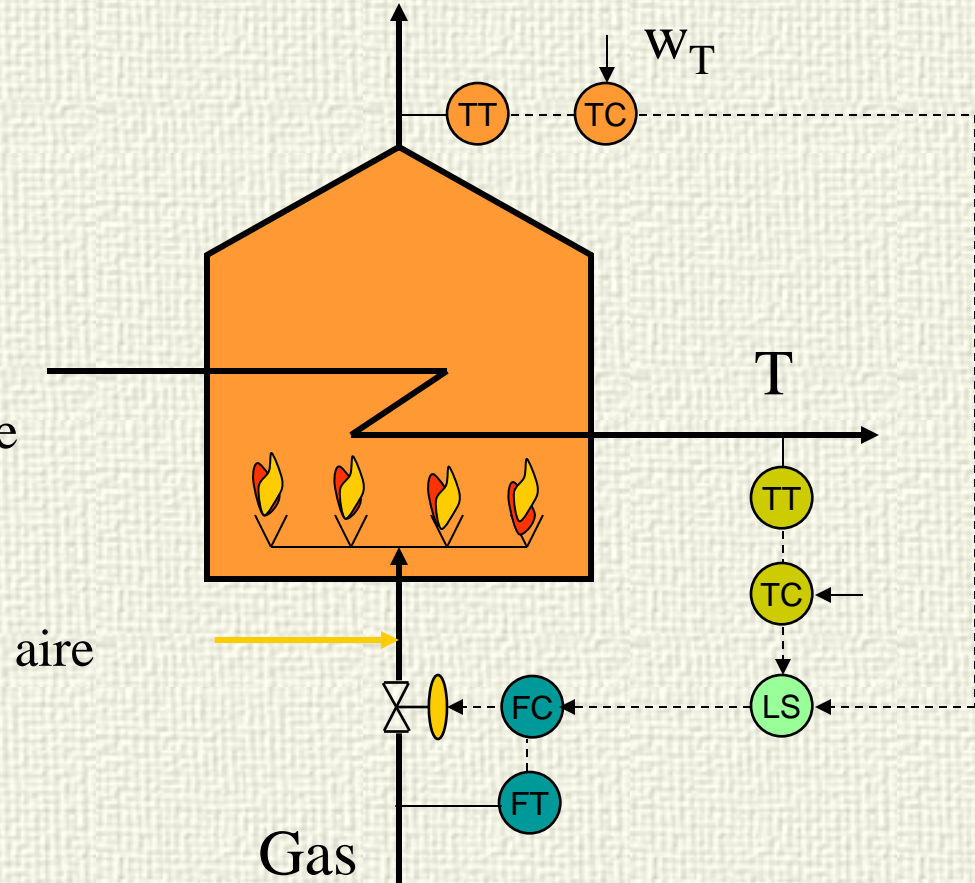




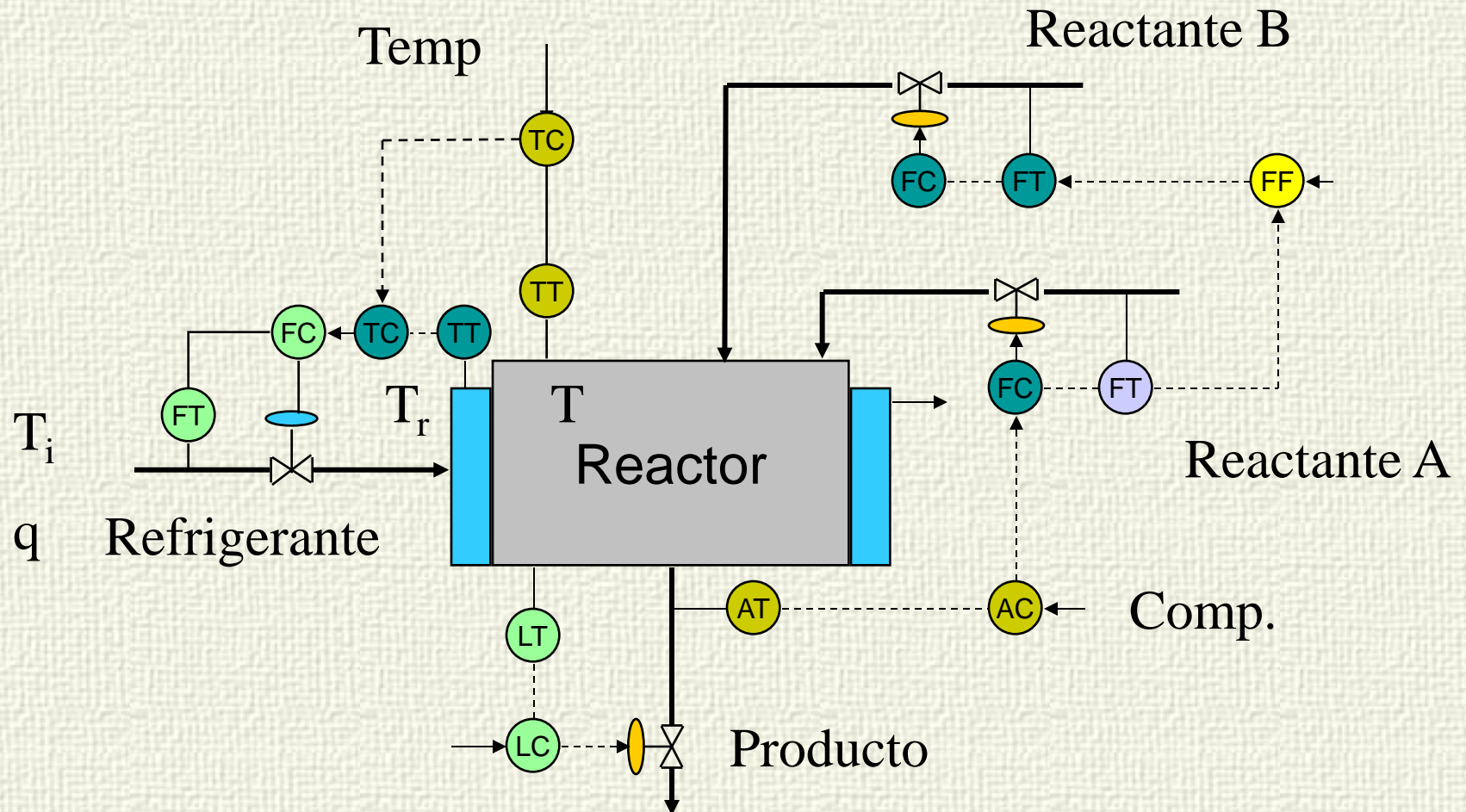
# Restricciones en variables

Control override

Perturbación:  
temperatura del aceite



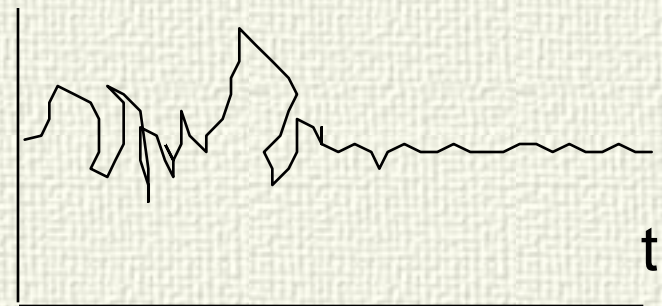
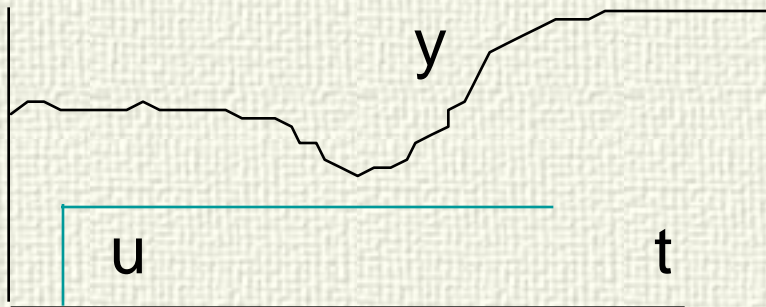
En procesos multivariables con interacción y restricciones en sus variables, perturbaciones, etc. las llamadas estructuras de control tienen limitaciones y son difíciles de mantener. En consecuencia, a menudo la unidad se regula manualmente por un operario.





# Campo del Control Avanzado

- ✓ En el caso de control monovariable, el PID tampoco es adecuado en casos de dinámica difícil, o con especificaciones exigentes:
- retardos grandes
  - respuesta inversa
  - inestabilidad
  - mínima varianza

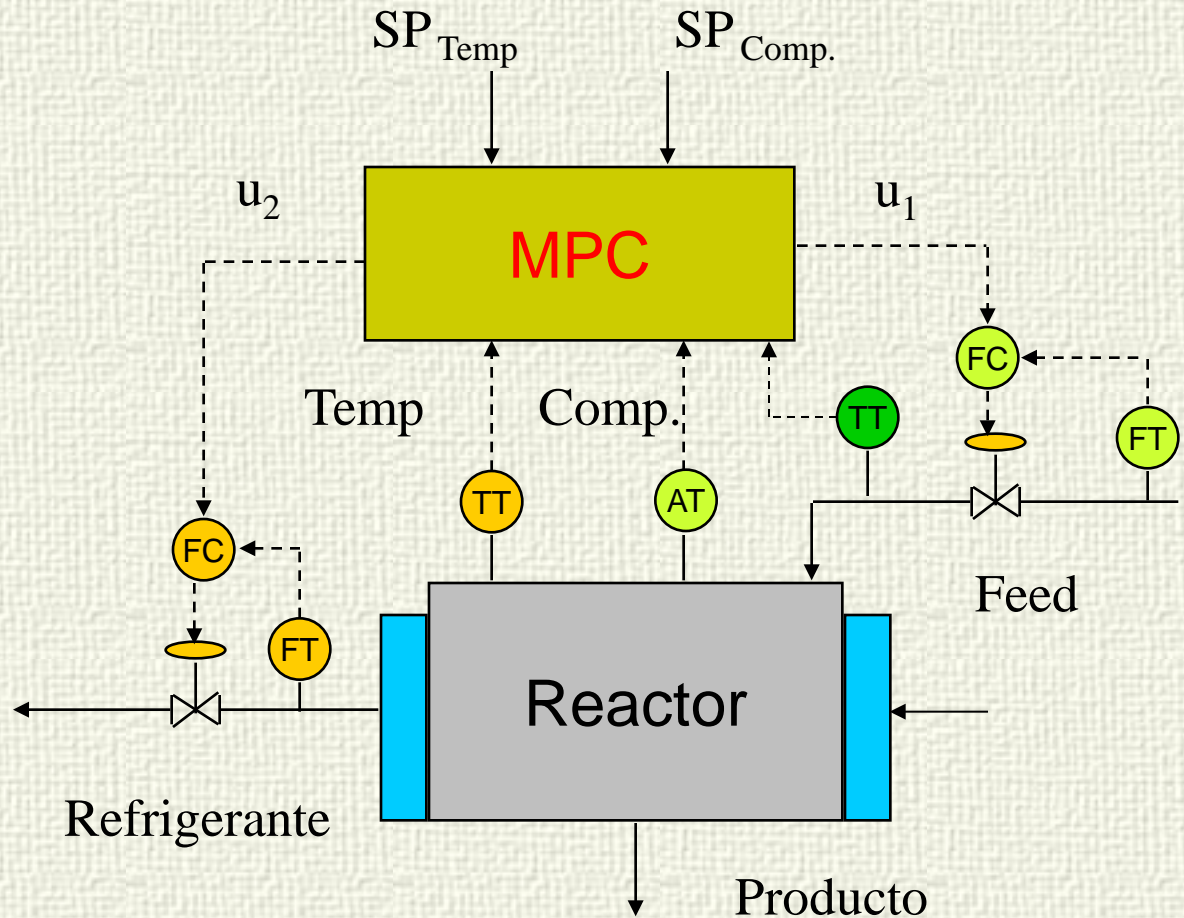




# MPC: Control Predictivo multivariable

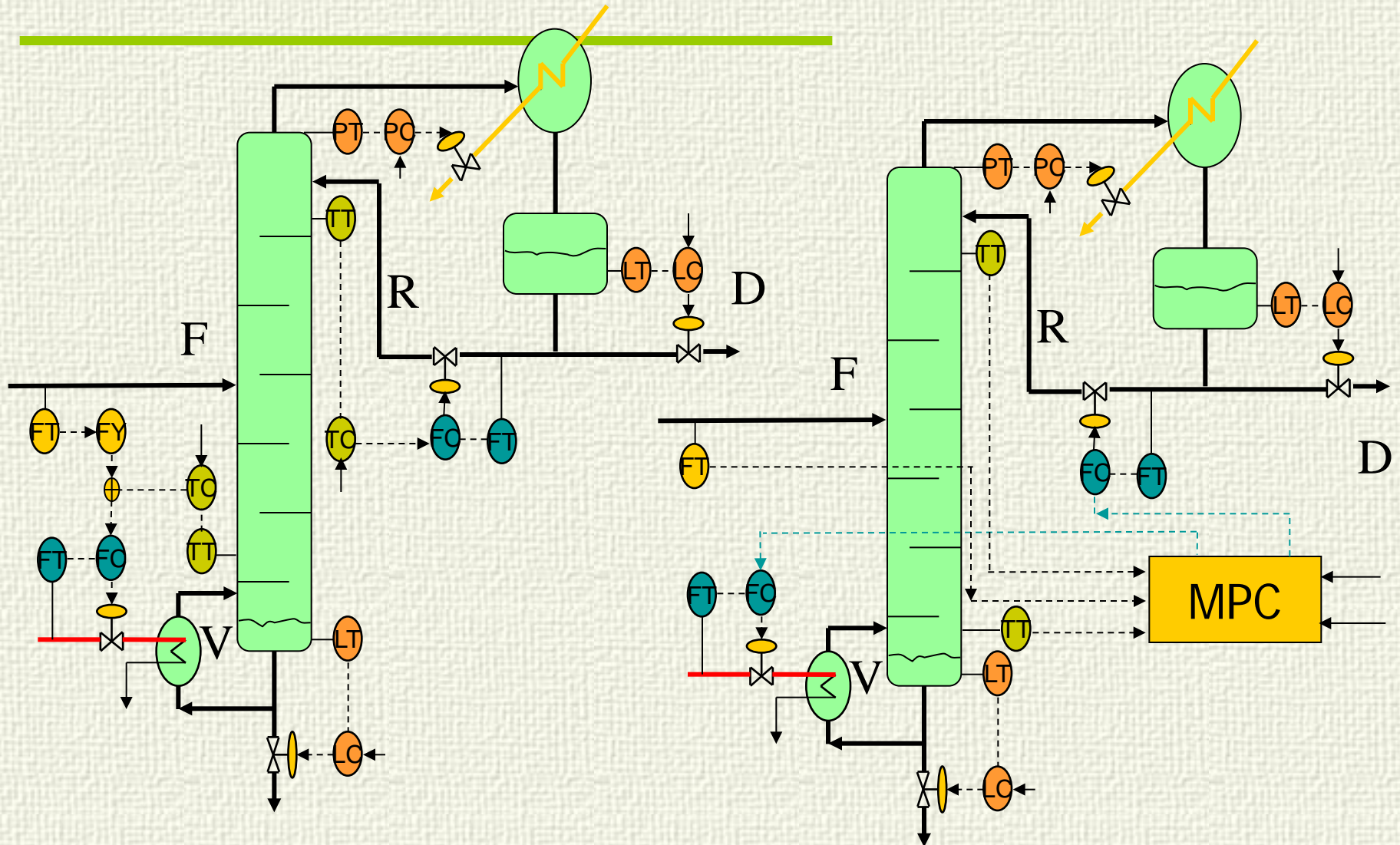


El control avanzado considera simultáneamente todas las variables del proceso, su interacción y restricciones las perturbaciones, etc. y permite realizar un control automático eficiente, abriendo las puertas a la optimización de su punto de operación.





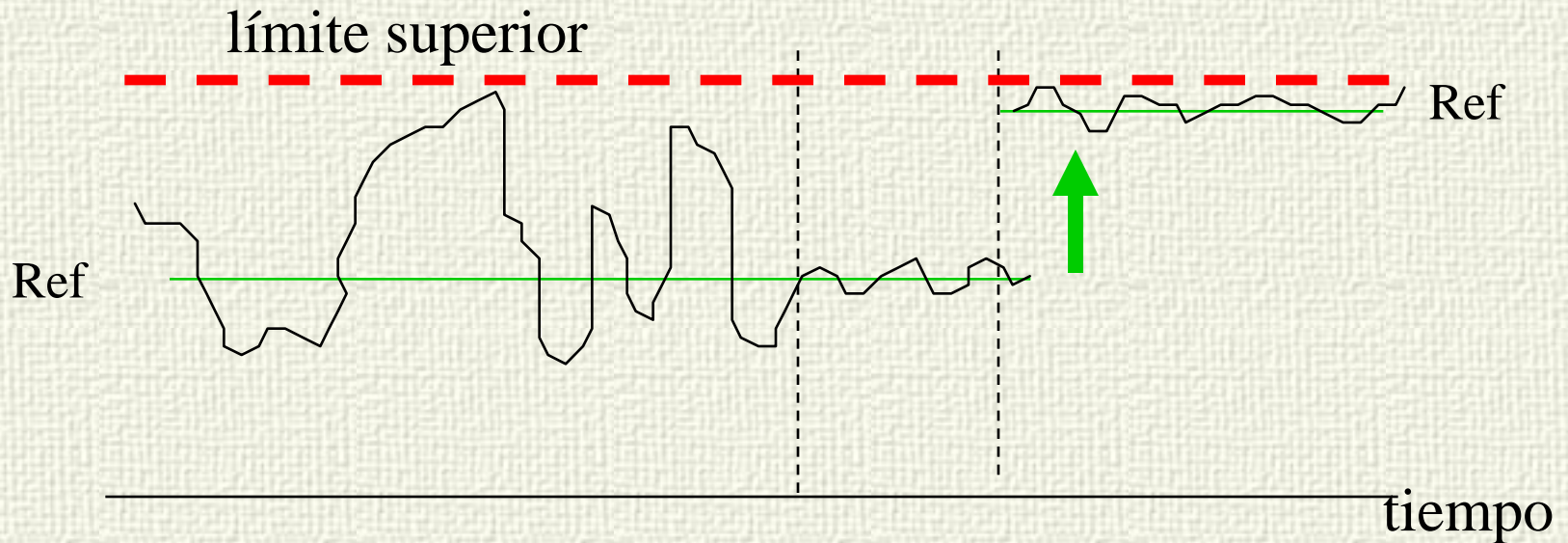
# MPC multivariable







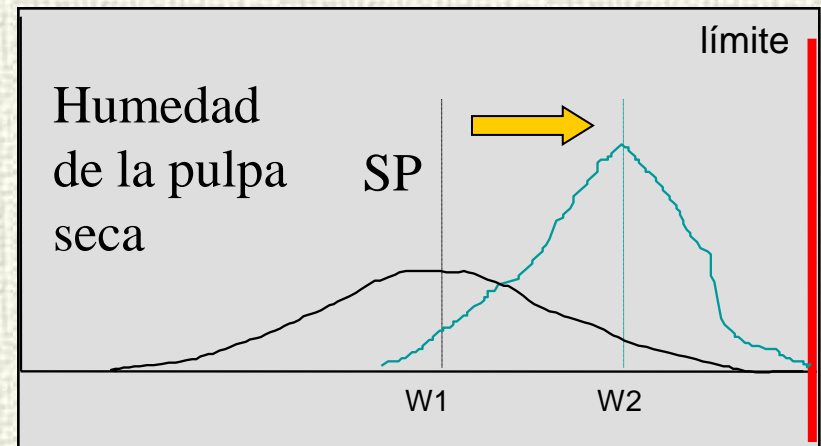
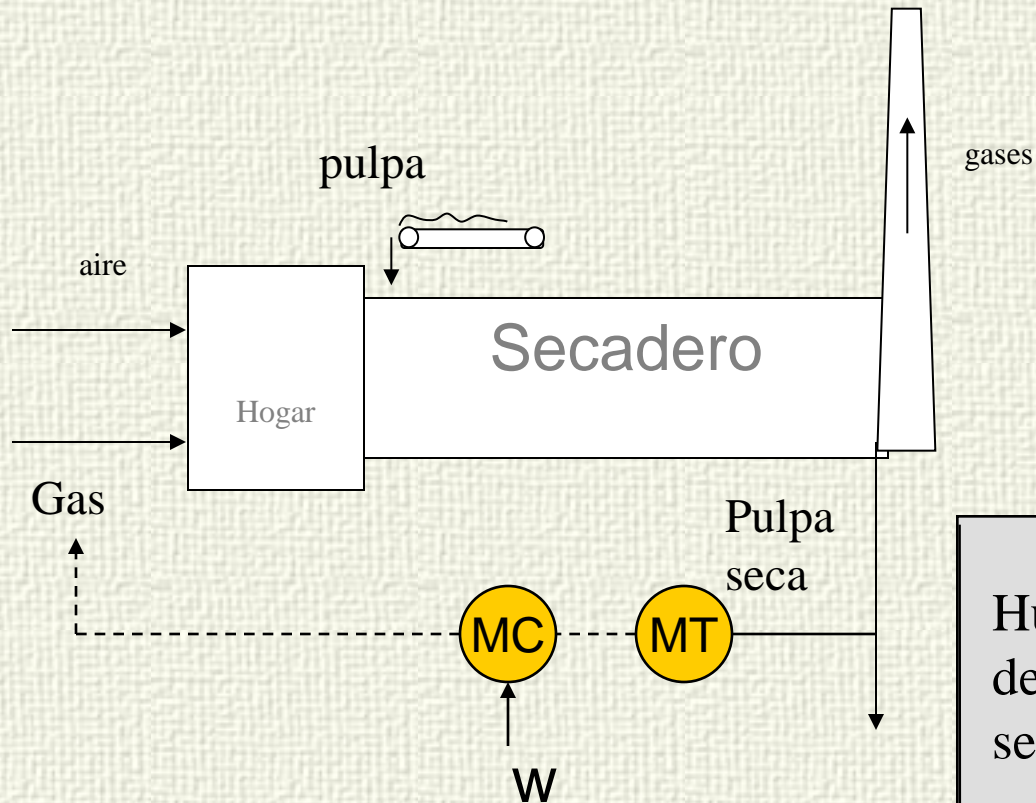
# Control y optimización



- La reducción de varianza permite mejorar la calidad y mover la referencia a un punto de operación más favorable económicamente, respetando los límites de la variable.
- La mejora del control permite la optimización.

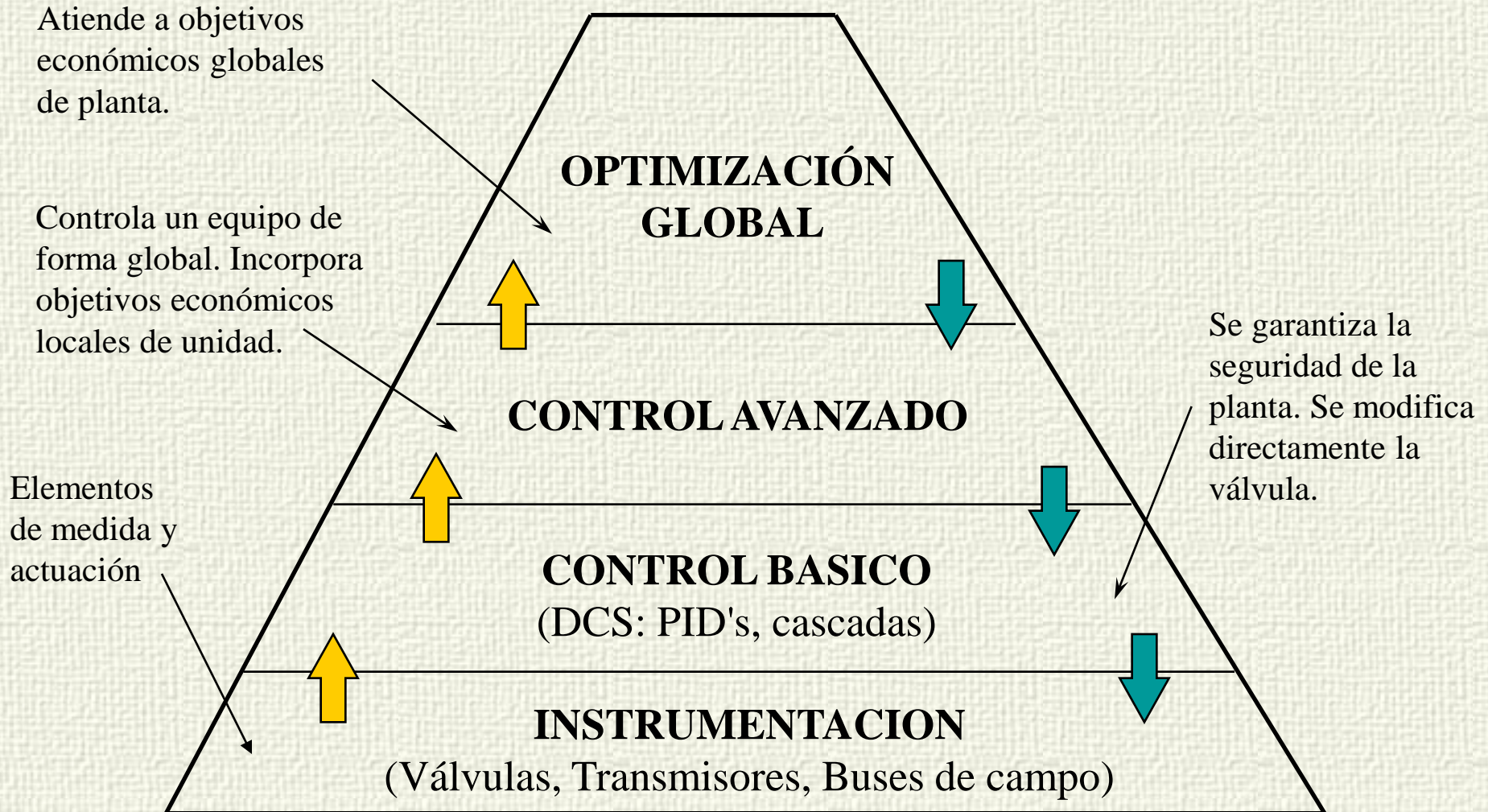


# Un mejor control permite la optimización económica



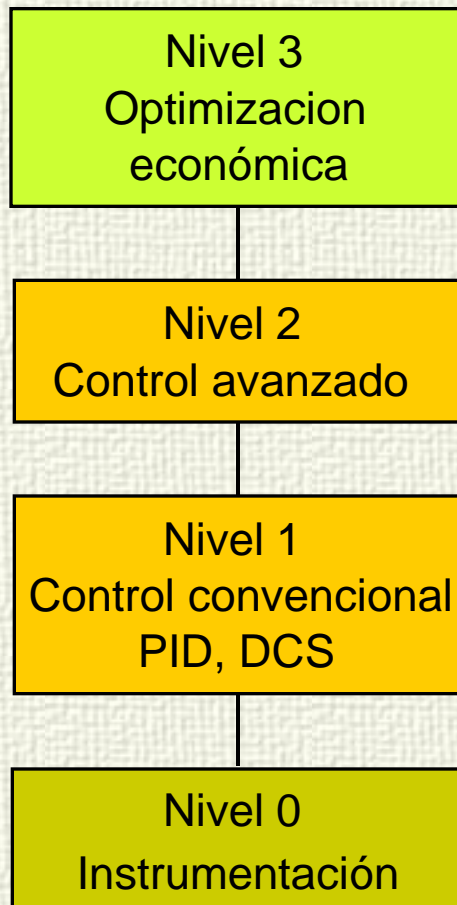


# Pirámide de Control

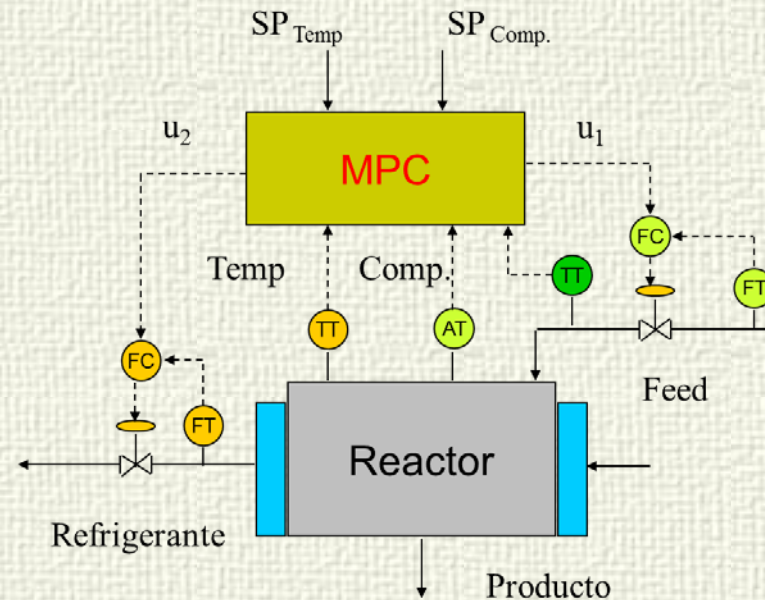




# Pirámide de Control



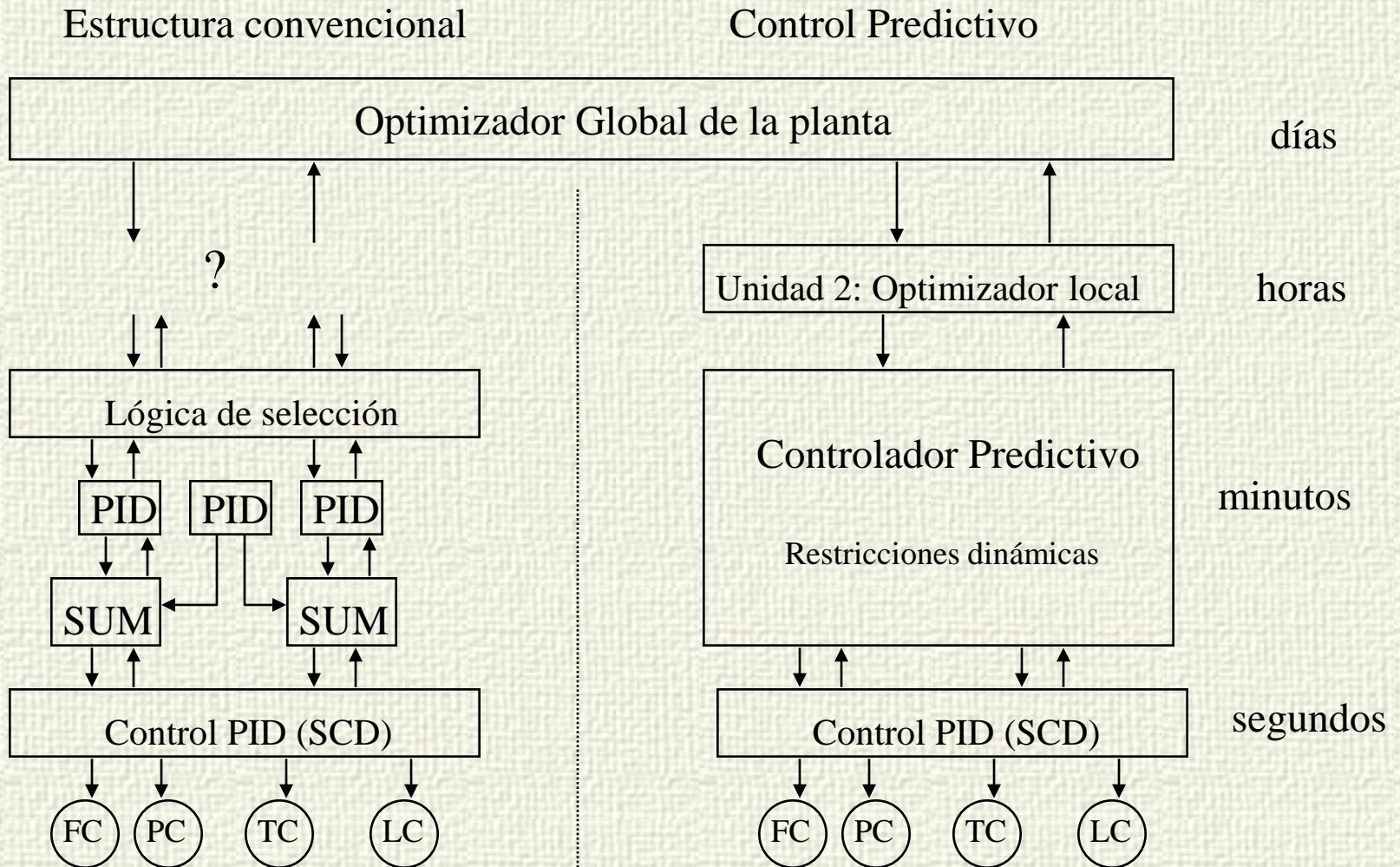
Para poder abordar problemas de un nivel, los niveles inferiores han de funcionar correctamente



El MPC se aplica en cascada con lazos simples

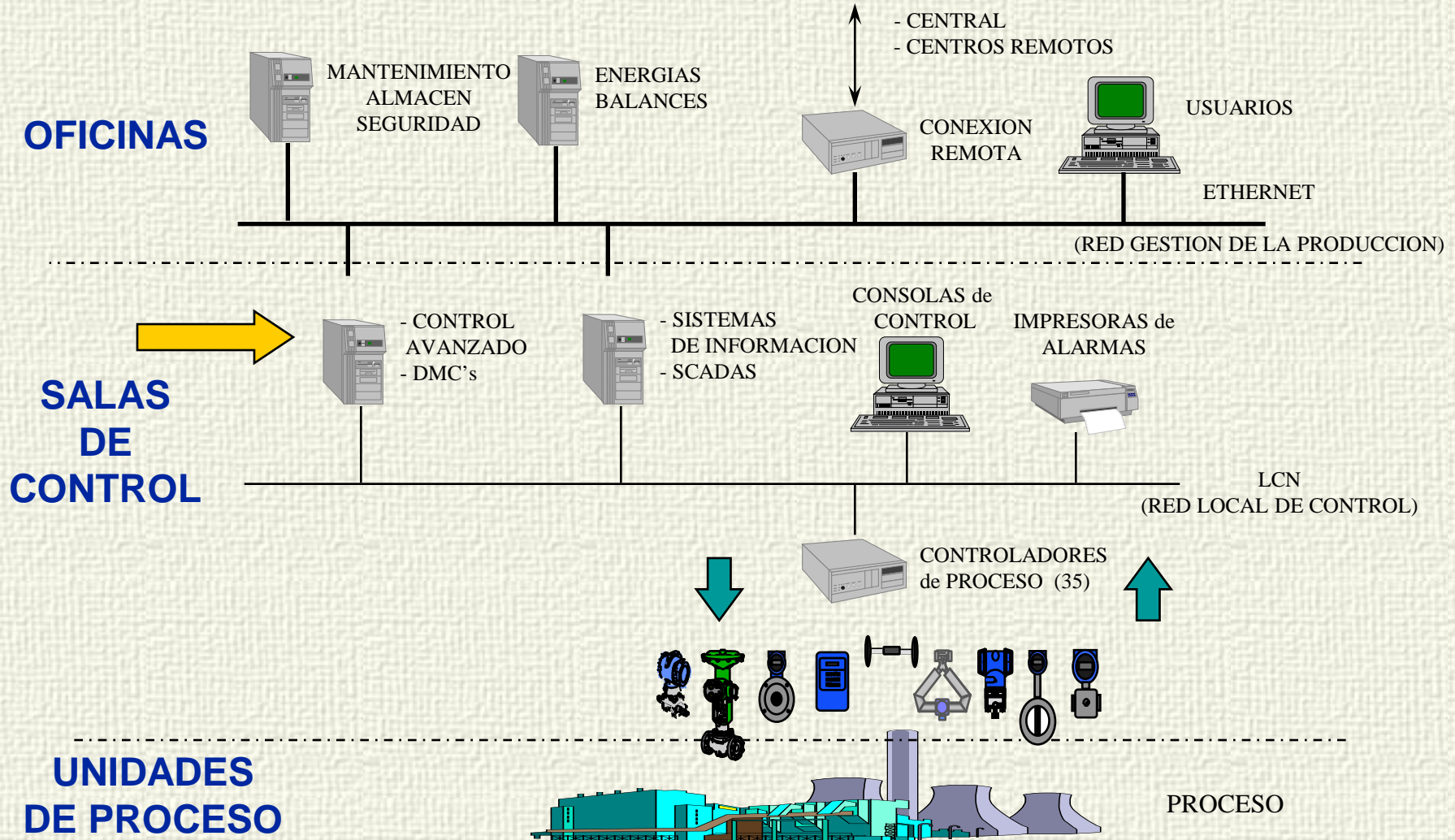


# Jerarquía de las funciones de control





# Situación del MPC





# Se necesita MPC en:

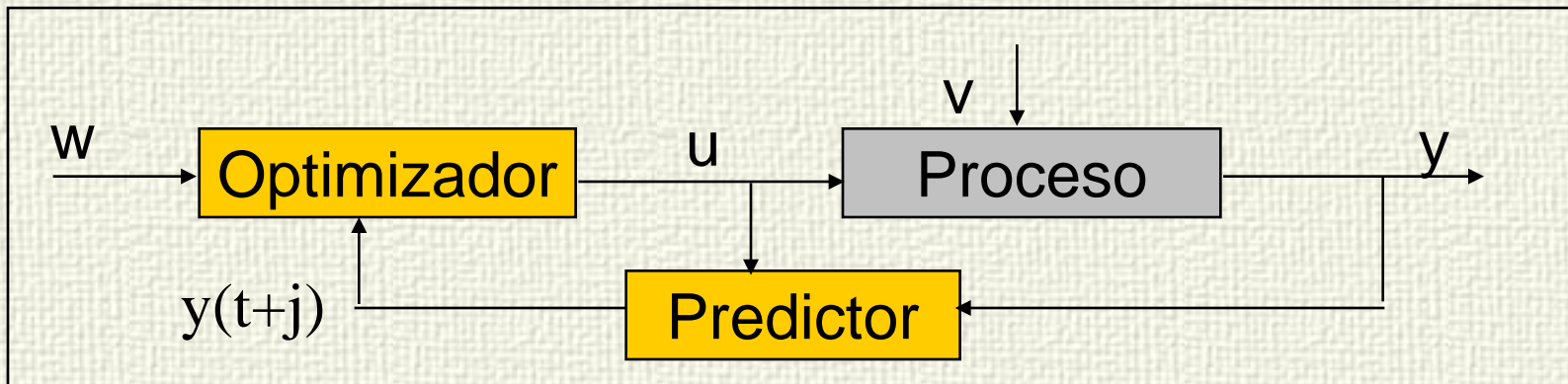
---

- ✓ Procesos de dinámica difícil, perturbaciones,..
- ✓ Procesos con varias variables manipuladas y controladas entre las que hay interacción (reactor químico, columna de destilación,...)
- ✓ Se necesita funcionar con límites en el valor de las variables manipuladas y/o controladas.
- ✓ Hay unas especificaciones exigentes (varianza mínima, etc.) sobre las variables.
- ✓ Hay especificaciones económicas



# CONTROL PREDICTIVO

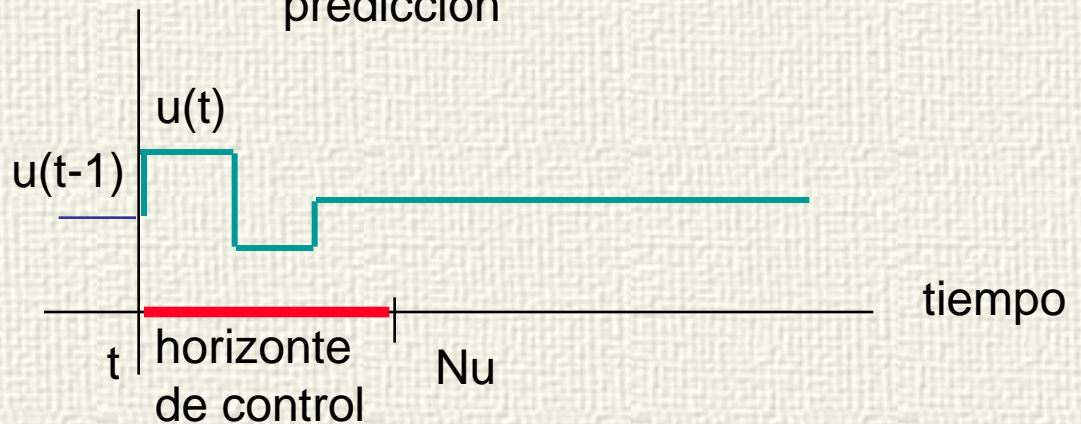
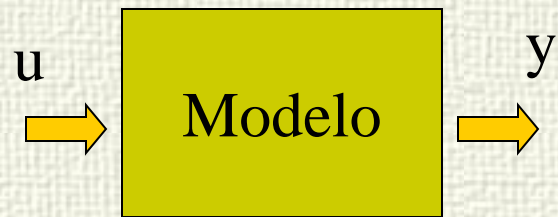
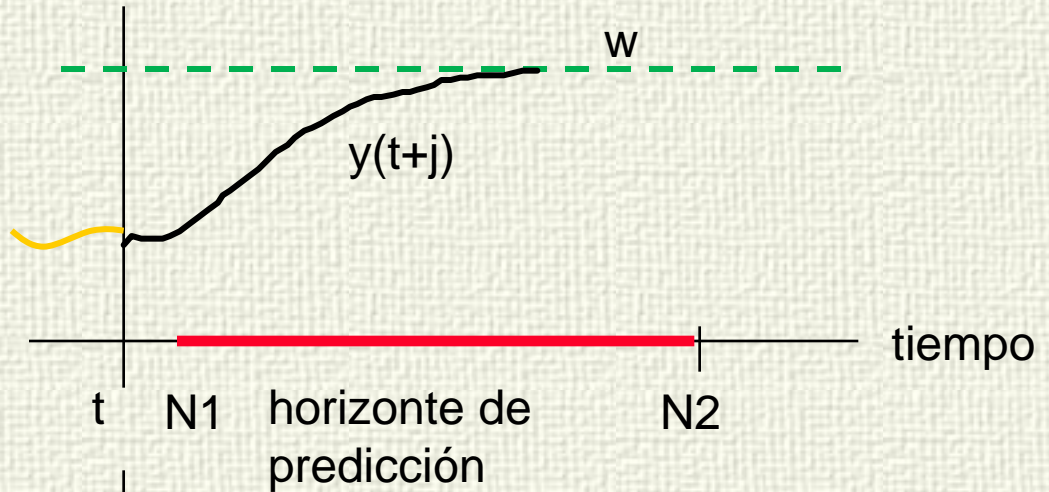
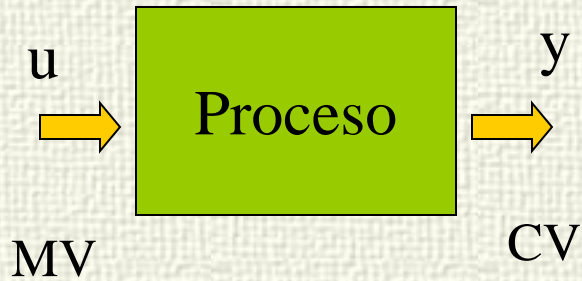
- estrategia de control basada en el uso explícito de un modelo del proceso para predecir el comportamiento futuro de la variable controlada sobre un horizonte temporal
- es factible por los cambios tecnológicos en computadores, técnicas de modelado, métodos numéricos,...
- existen muchos algoritmos con unos principios comunes





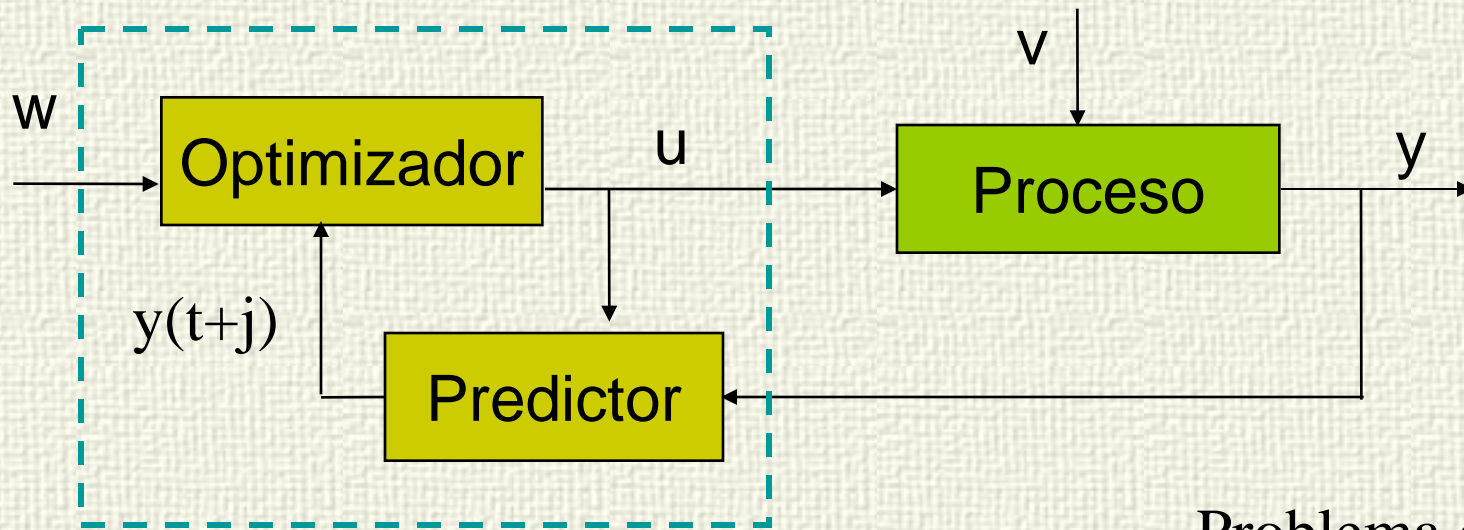


# Control Predictivo





# MPC



$$\min_{\Delta u} J = \sum_{j=N_1}^{N_2} [\hat{y}(t+j) - w(t+j)]^2 + \sum_{j=0}^{N_u-1} [\beta \Delta u(t+j)]^2$$

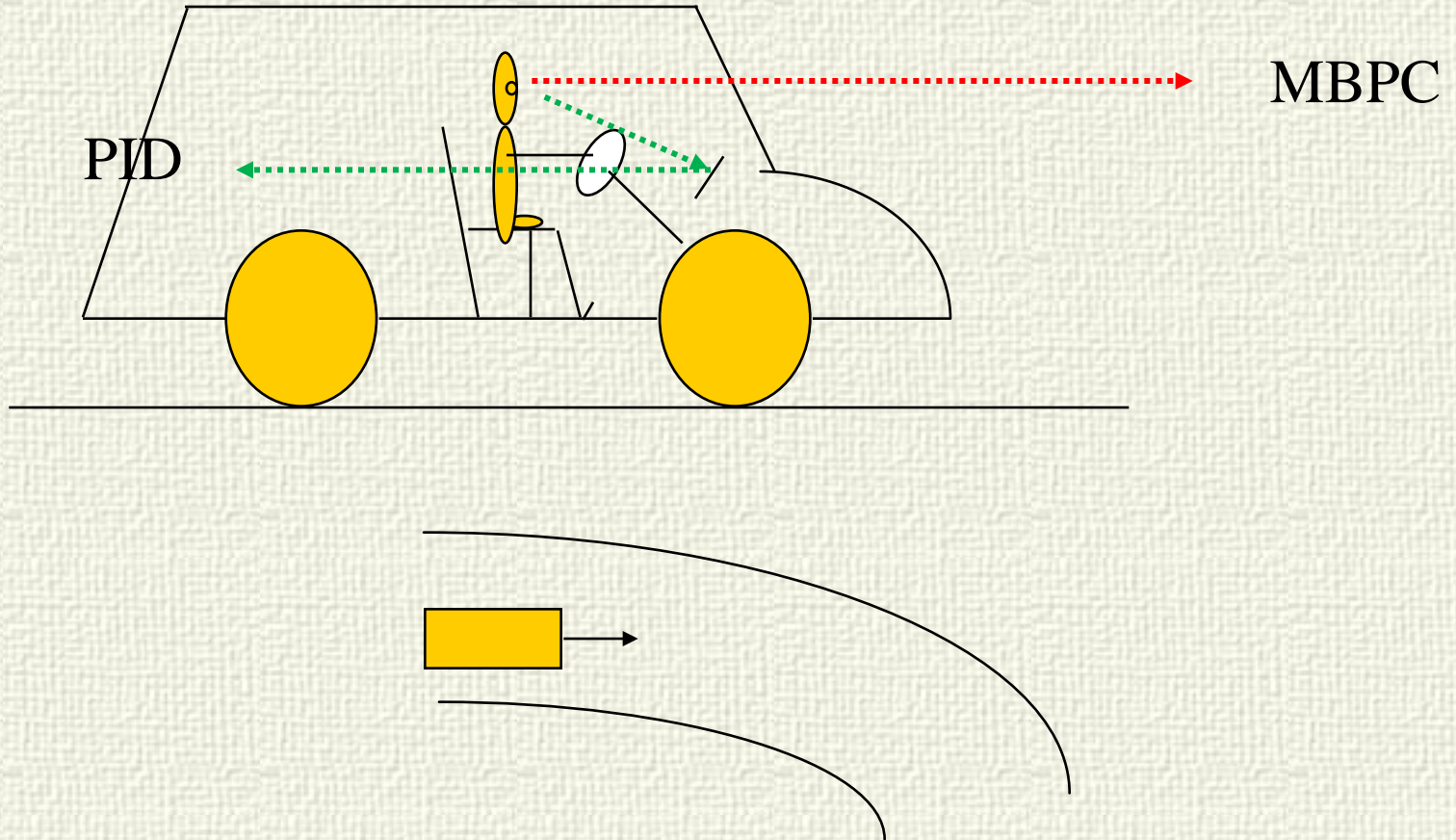
$$x(t+1) = Ax(t) + Bu(t) \quad y(t) = Cx(t)$$

$$\underline{y} \leq y(t+j) \leq \bar{y} \quad \underline{u} \leq u(t+j) \leq \bar{u}$$

Problema de optimización resuelto en línea cada periodo de muestreo



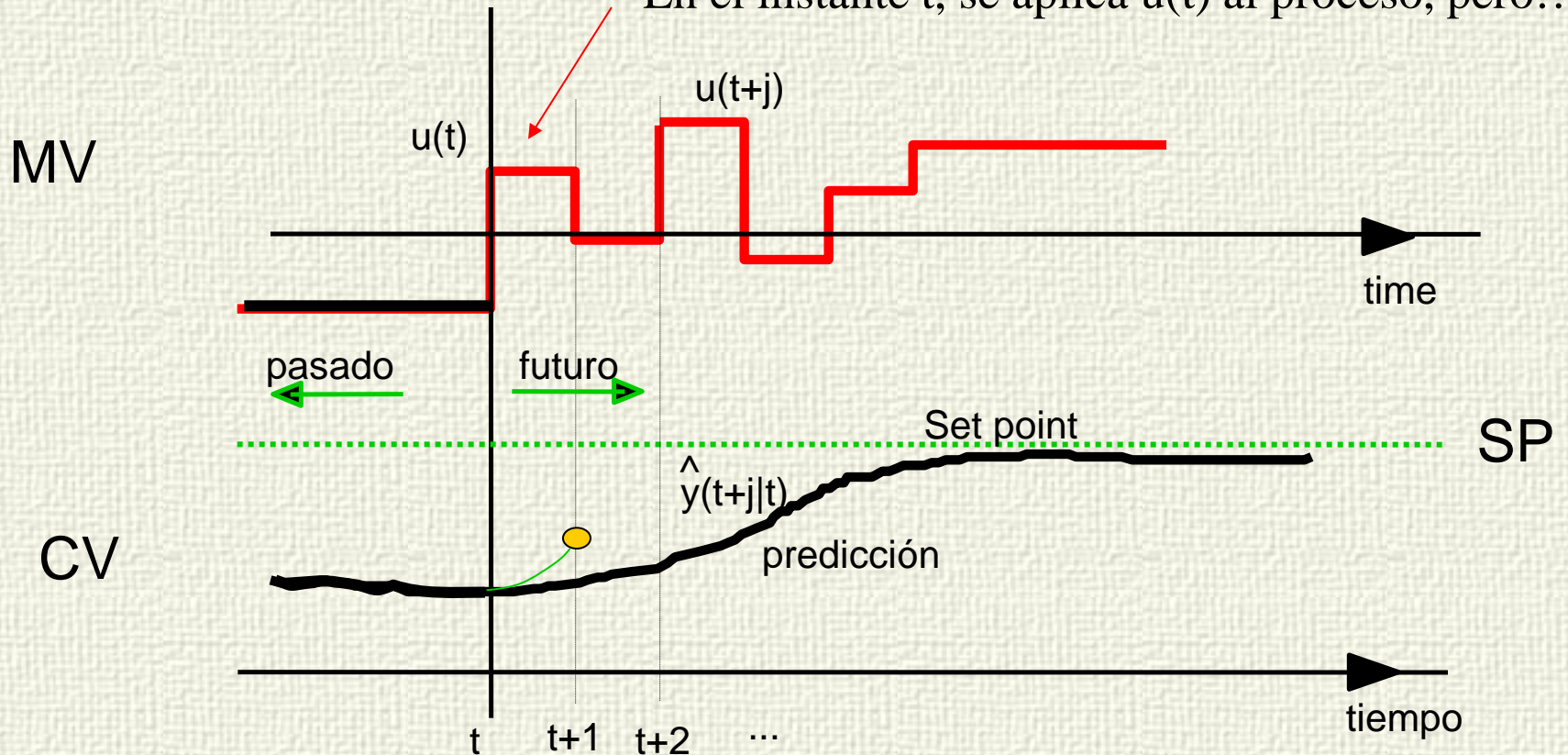
# Control predictivo





# Implementación del MPC

En el instante  $t$ , se aplica  $u(t)$  al proceso, pero...

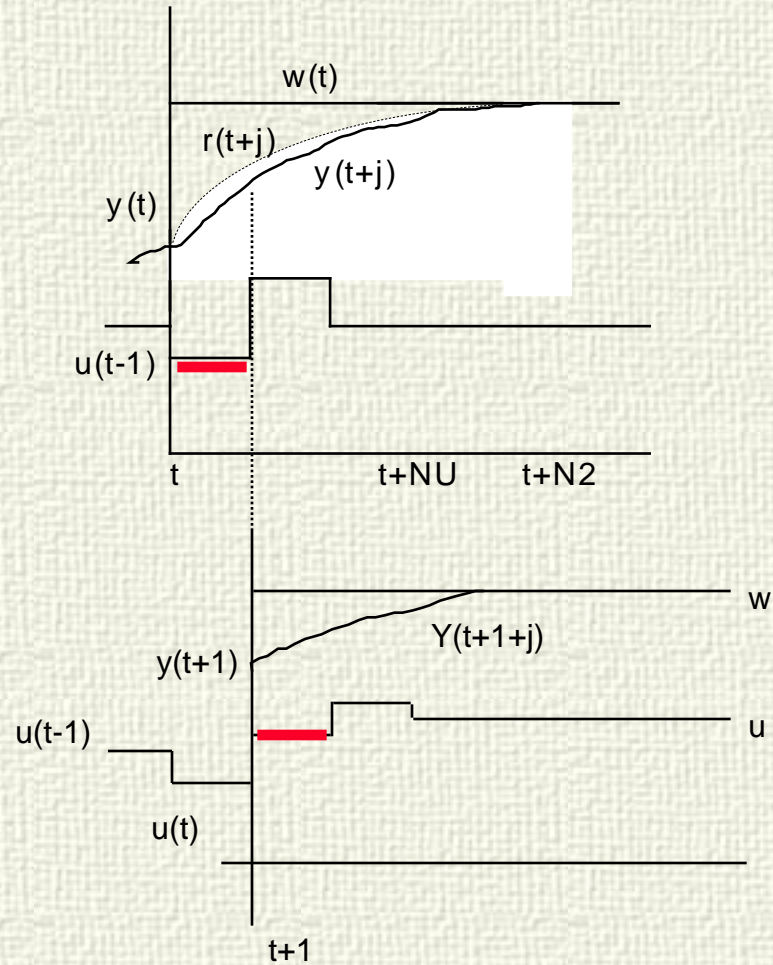


Política de horizonte móvil

...en el instante  $t + 1$ , todo el proceso se repite con la nueva información disponible



# Implementación del MPC





# Control Predictivo Basado en Modelos (MPC/MBPC)



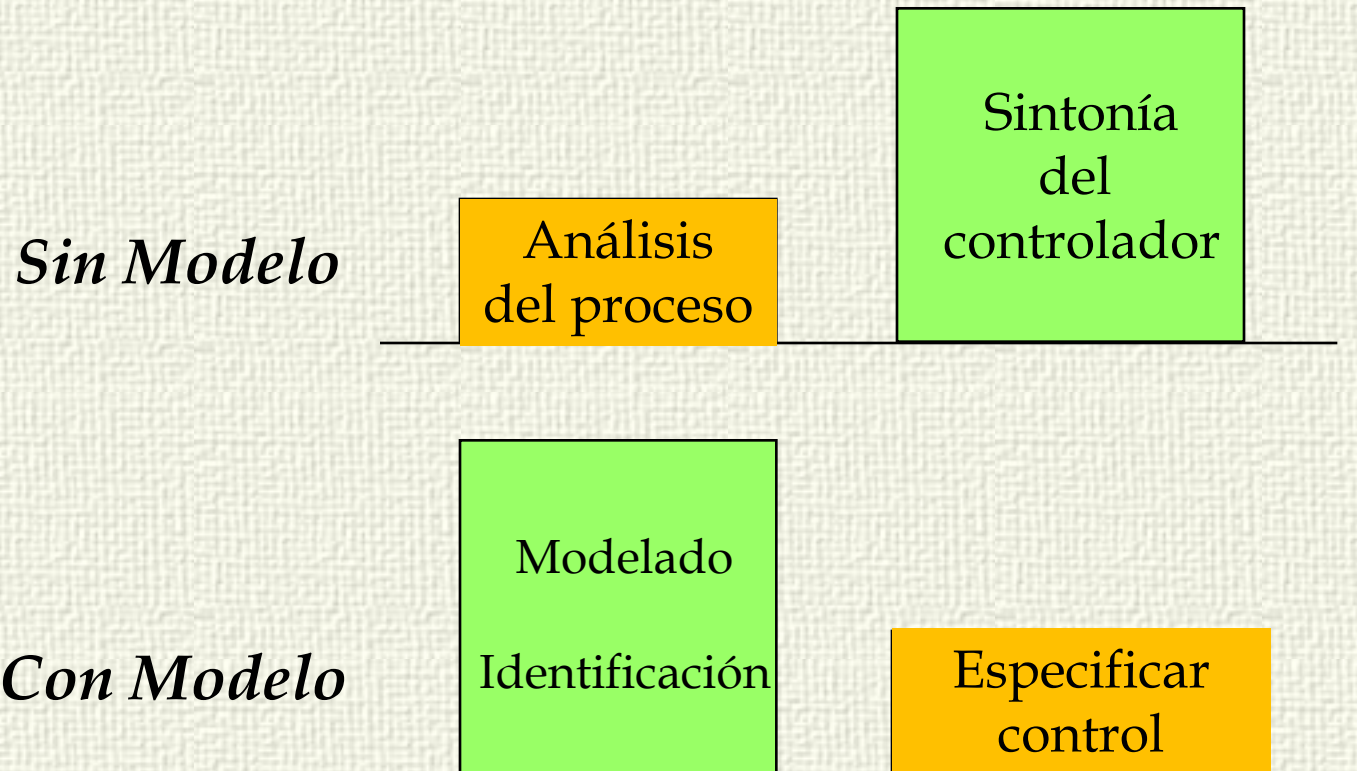
- procesos mono o multivariable, incluso con distinto número de variables manipuladas y controladas
- procesos estables o inestables en lazo abierto con dinámica difícil: retardos, respuesta inversa, interacción,...
- permite trabajar con restricciones sobre las variables manipuladas y controladas
- compensación de perturbaciones medibles (acción feedforward)
- buen compromiso entre la robustez y las características de funcionamiento
- Fácil de comprender por los usuarios
- fácil de mantener
- el modelado en línea abre el camino de la supervisión, el diagnóstico, la optimización económica,..
- son adecuadas las técnicas de diseño asistido por ordenador

**Pero necesita un modelo dinámico del proceso**



# Inversión de Tiempo

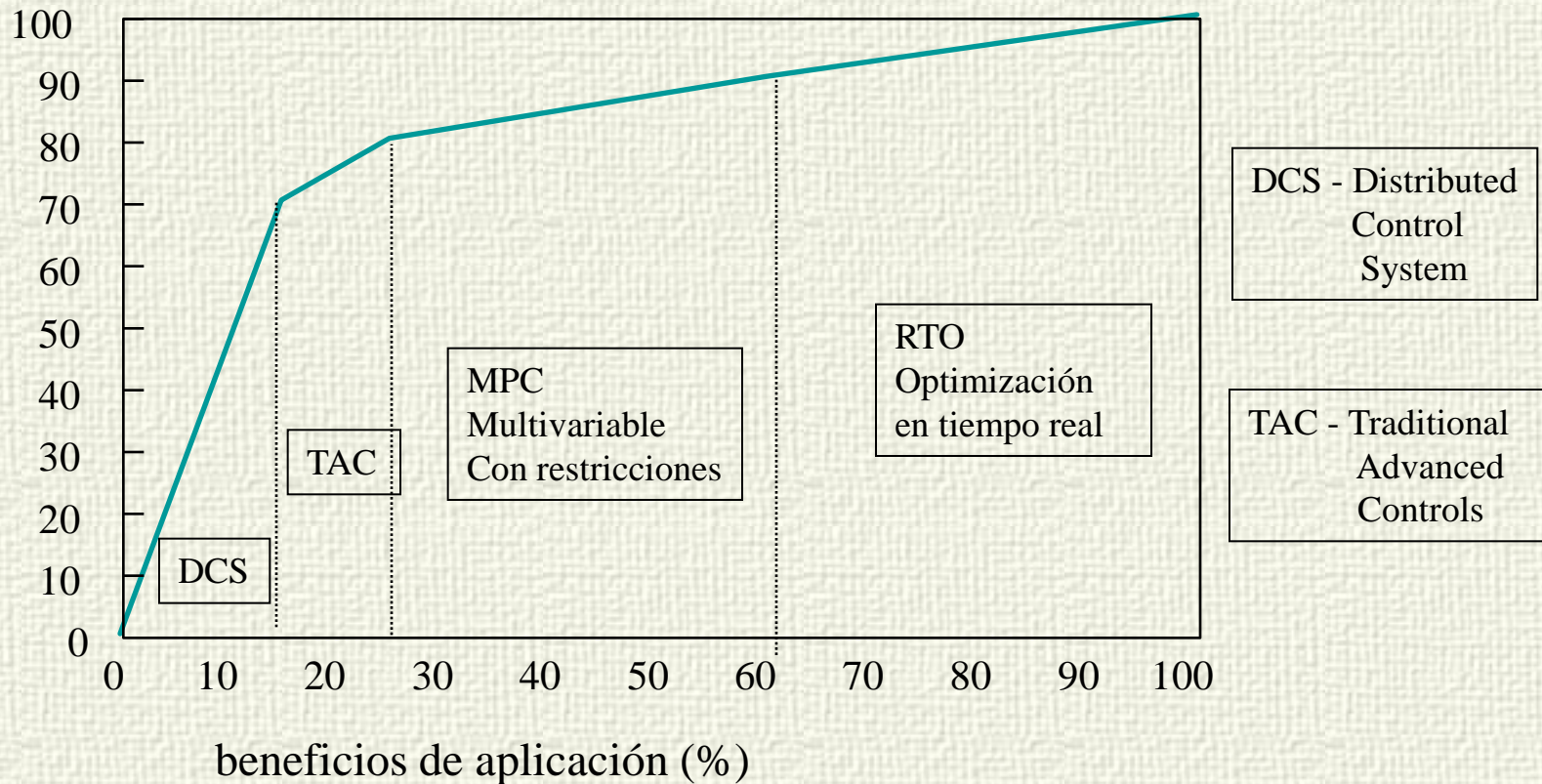
---





# Beneficios esperados del MPC

Costes de Capital (incluyendo personal) (%)







# Reseña histórica

---

- J. Richalet (1978): IDCOM, MPHC, PFC, ...
- Prett, Gillete, Cutler, Rmaker (1979): DMC
- De Keyser, 1979: EPSAC
- D. Clarke, 1987: GPC
- Martín-Sánchez, 1984: APC
- Lemos, Mosca, 1985: MUSMAR
- .Morari
- Rawlings and Muske
- Kouvaritakis, Scatolini, Allgower...,...
  
- Mayne, Engell, ...



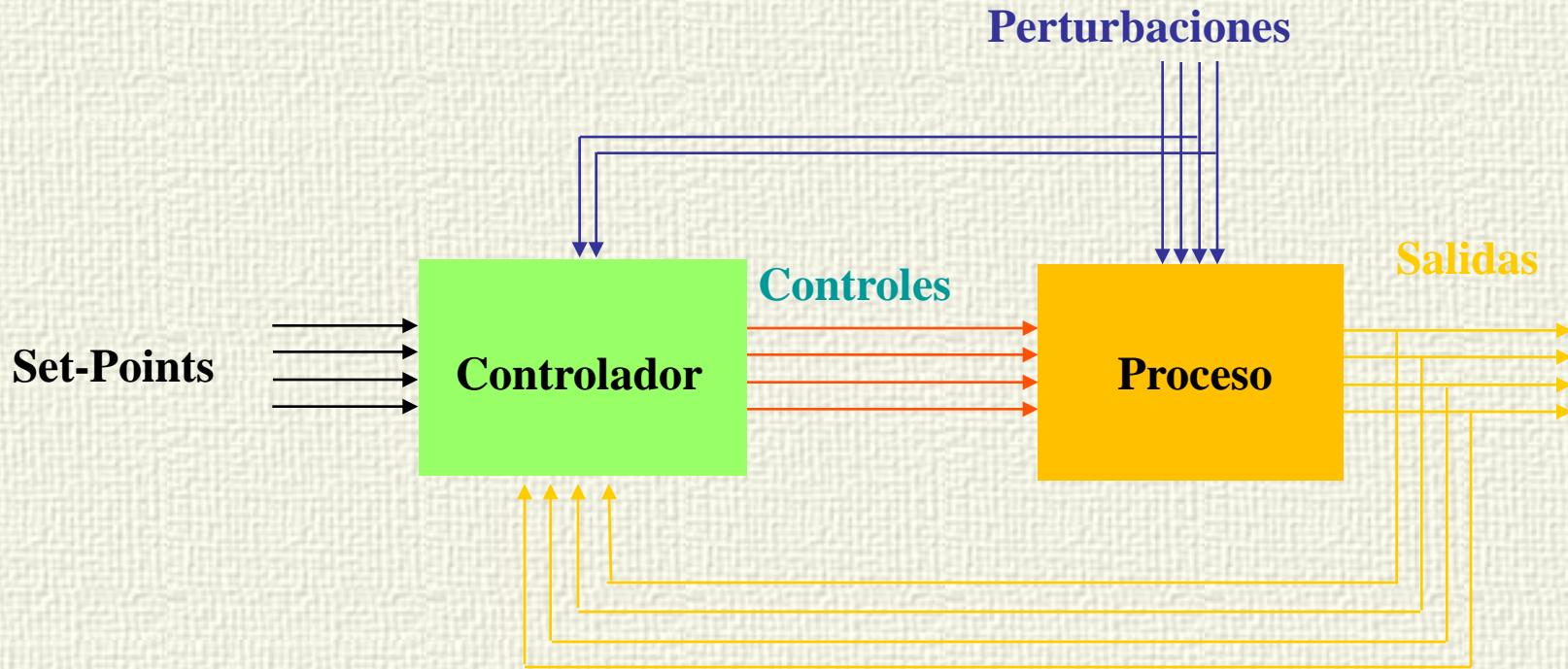
# Elementos clave del MPC

---

- Modelo interno usado para efectuar predicciones del comportamiento futuro
- Señal de Referencia
- Cálculo de las señales de control que proporcionan un mejor escenario futuro
- Estructuración de la ley de control
- Estrategia de horizonte móvil

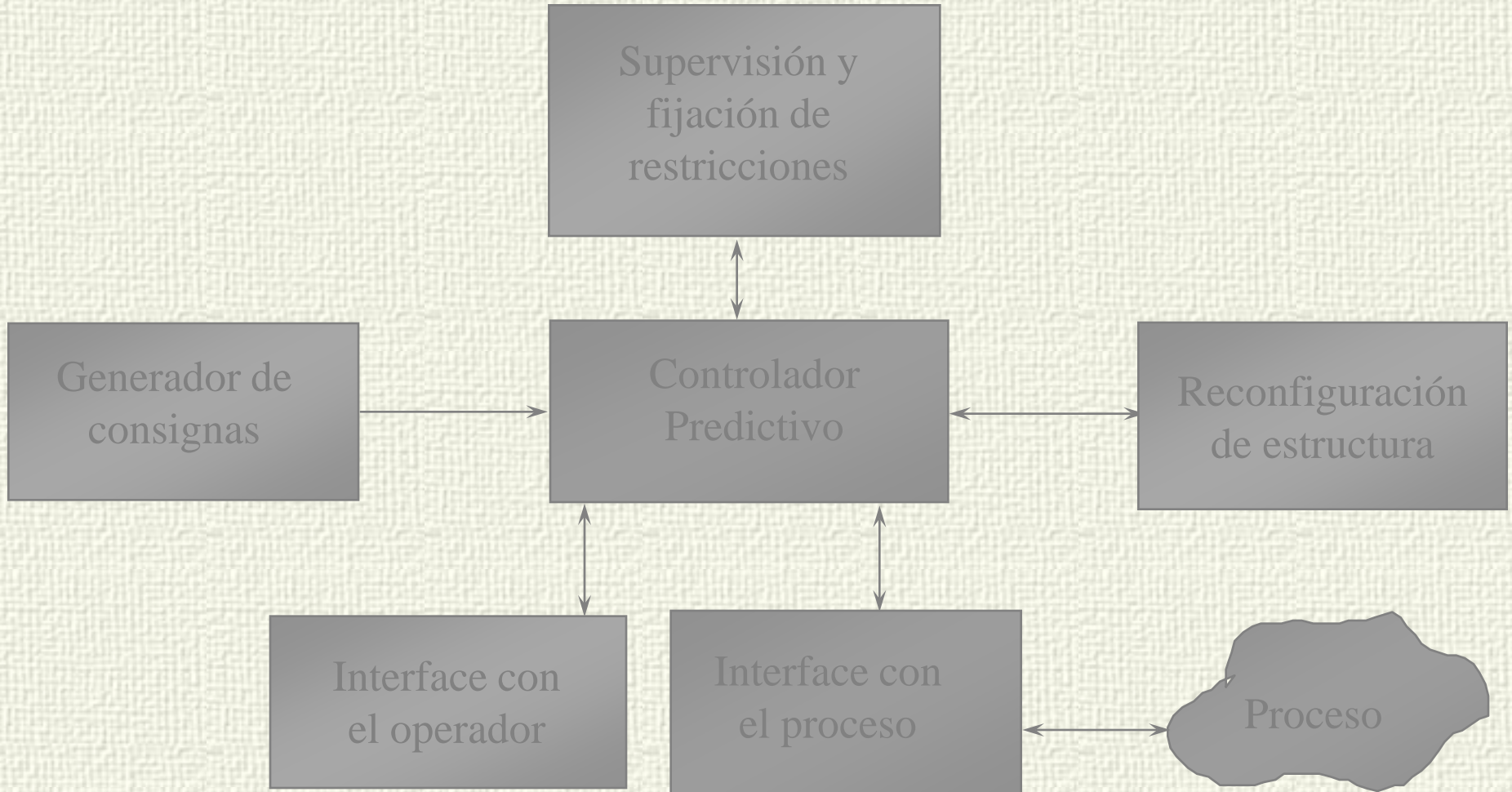


# Implementación práctica





# Módulos Funcionales





# FASES DE UN PROYECTO

---

- ✓ Elegir aplicación
- ✓ Diseño preliminar
- ✓ Modelado: Pruebas preliminares y en planta
- ✓ Identificación
- ✓ Calculo de la función de costo
- ✓ Pruebas y sintonía en simulación
- ✓ Comisionado
- ✓ Finalización: formación, documentación, seguimiento



# Identificar la aplicación

---

- ✓ Análisis de potenciales beneficios.
- ✓ Problemas de control
- ✓ Oportunidad
- ✓ Recursos disponibles



# Diseño preliminar

---

- ✓ Revisión del proceso: comprender el proceso que quiere controlarse.
- ✓ Restricciones operativas
- ✓ Criterios económicos
- ✓ Elección de variables manipuladas, controladas y de perturbación



# Pruebas preliminares

---

- ✓ Revisar instrumentación y ajustes
- ✓ Verificar cálculos inferenciales
- ✓ Verificar el rango de variación aceptable en las variables controladas
- ✓ Obtener de manera aproximada la magnitud de los cambios a producir en las variables manipuladas





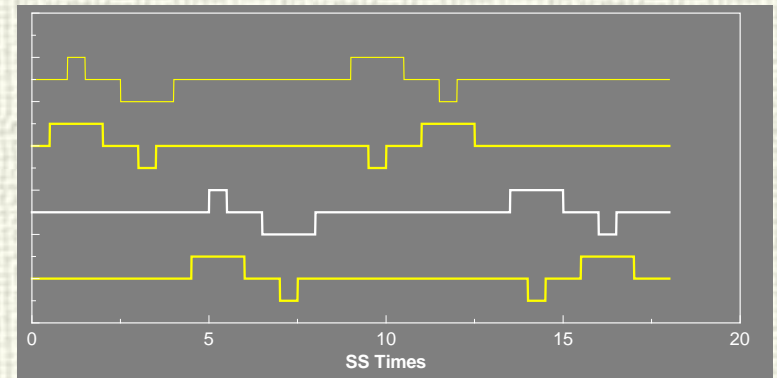
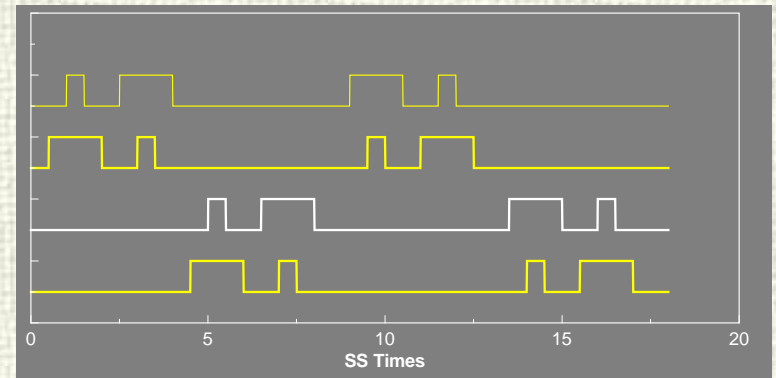
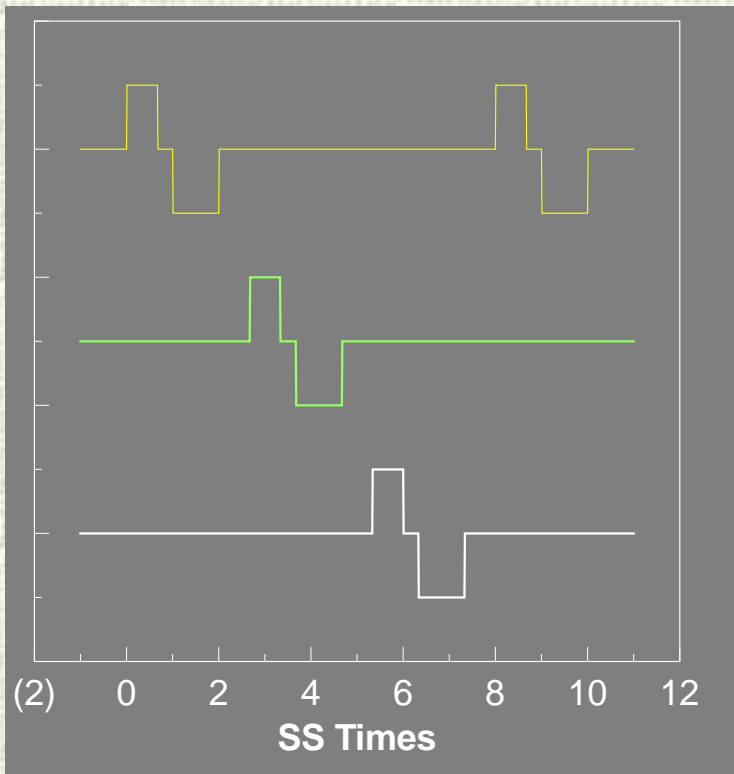
# Pruebas en planta (step test)

---

- ✓ Realizar 15-20 movimientos en cada variable independiente
- ✓ Duración:  $8..10 * (\# \text{ Independientes}) * (T_{ss})$
- ✓ Evitar movimientos correlacionados
- ✓ Iniciar la identificación cuando ha transcurrido la cuarta parte del tiempo estimado de step-test



# Test





# Identificación de los modelos dinámicos

---



- ✓ Analizar distintos casos
- ✓ Identificar los datos válidos para la obtención de modelos
- ✓ Seleccionar tipo de modelo, número de coeficientes y tiempos de estabilización
- ✓ Construir el modelo final con una herramienta de identificación



# Cálculo de la función de costo

---

- ✓ Función objetivo
- ✓ Costes operativos.
- ✓ Criterios LP:
  - económico
  - mínimo movimiento



# Simulación off-line

---

- ✓ Establecer unos parámetros de ajuste de partida de acuerdo a los objetivos y la dinámica del proceso
- ✓ Evaluar el efecto de modificar los costes de la función objetivo
- ✓ Evaluar el efecto de modificar ajustes



# Comisionado

---

- ✓ Formación informal a operadores
- ✓ Conectar el controlador con rangos estrechos en las variables manipuladas
- ✓ Modificar ajustes si es necesario
- ✓ Ampliar los rangos de las variables manipuladas
- ✓ Modificar los límites de las variables controladas



# Finalización del proyecto

---

- ✓ Formación rigurosa a los operadores
- ✓ Documentación detallada de todas las fases del proyecto
- ✓ Evaluación de beneficios
- ✓ Plan de seguimiento