

---

# La digitalización en las EDAR: Automatización, Control Automático e Inteligencia Artificial

---



**Ion Irizar**

Responsable de I+D y Digitalización



**“Desde el conocimiento al mercado”**

**P1. Control en lazo cerrado**

**P2. Fangos Activos convencionales**

**P3. SBR, BRM, Lecho móvil, Digestión anaerobia**

**P4. Aspectos prácticos de control e Inteligencia Artificial**

**P1. Control en lazo  
cerrado**

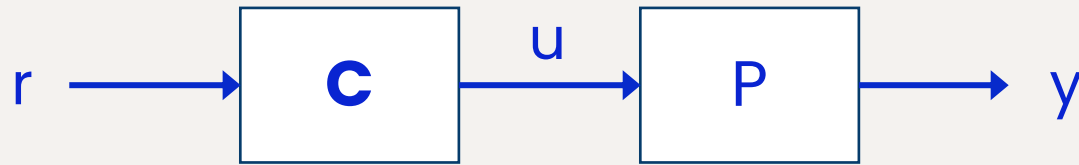
**P2. Fangos Activos  
convencionales**

**P3. SBR, BRM, Lecho  
móvil, Digestión  
anaerobia**

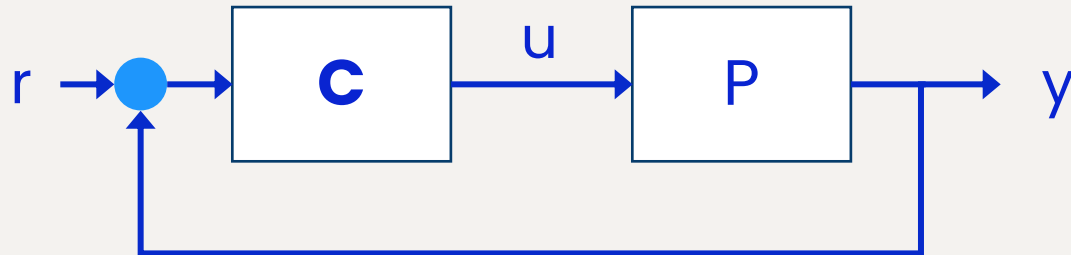
**P4. Aspectos  
prácticos de control  
e Inteligencia  
Artificial**

# PI. Control en lazo cerrado

- Control Lazo abierto VS Control lazo cerrado



$$y = Pu = PCr \rightarrow \frac{y}{r} = PC$$

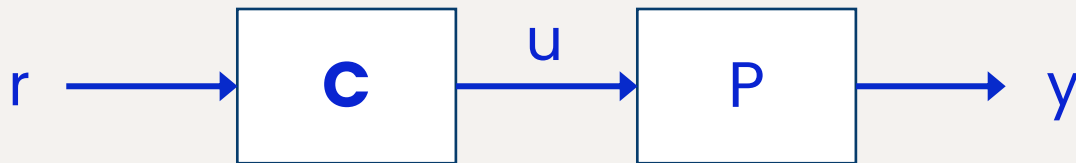


$$\frac{y}{r} = \frac{PC}{1 + PC}$$

- Objetivo de control:  $y \cong r$

# PI. Control en lazo cerrado

- Propiedad #1: **Atenuación de la incertidumbre de P**
  - Supongamos  $P = 5$  (sistema estático, sin incertidumbre)
  - Si  $C=1/5 \Rightarrow y = r$

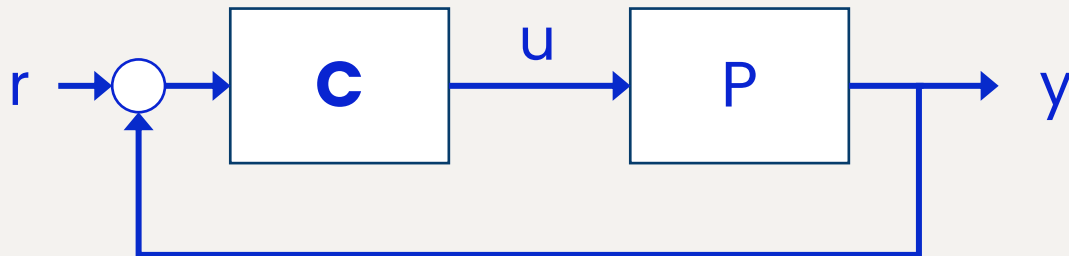


$$y = Pu = PCr \rightarrow \frac{y}{r} = PC$$

- Supongamos  $P = [4-6]$  (incertidumbre)
- Si  $C=1/5 \Rightarrow y = [0.8-1.2] r$
- **El lazo abierto no es capaz de atenuar la incertidumbre de P**

# PI. Control en lazo cerrado

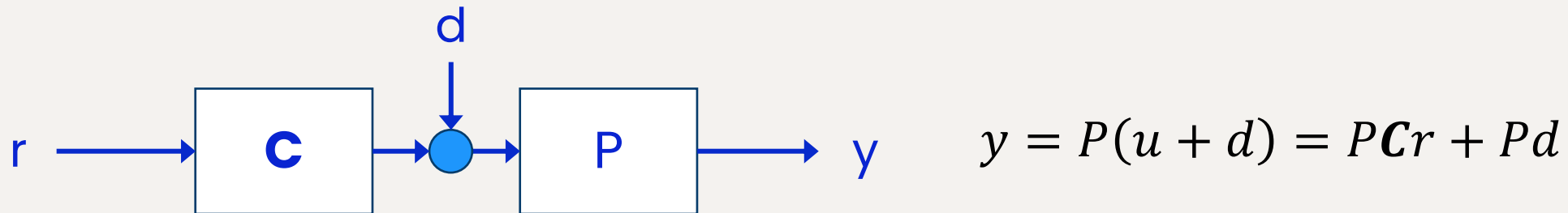
- Propiedad #1: **Atenuación de la incertidumbre de P**
  - Supongamos  $P = [4-6]$  (incertidumbre)
  - Si C es tal que  $PC \gg 1 \Rightarrow \mathbf{y} \cong \mathbf{r}$
  - Ej:  $\mathbf{C}=\mathbf{10} \Rightarrow \mathbf{y} = [40/41, 50/41] \mathbf{r} = [0.975, 0.980] \mathbf{r}$
  - El lazo cerrado atenúa la incertidumbre de P



$$\frac{y}{r} = \frac{PC}{1 + PC}$$

# PI. Control en lazo cerrado

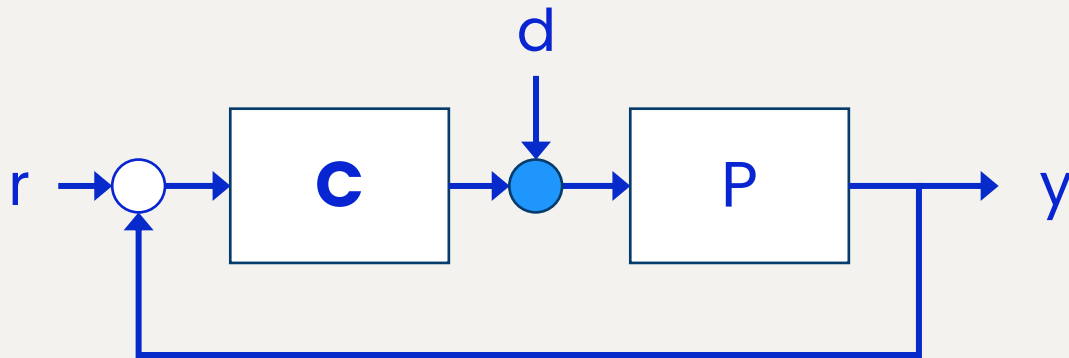
- Propiedad #2: **Rechazo de perturbaciones no medibles**
  - Supongamos  $P = 5$  (sin incertidumbre) y  $d=0.5$
  - Si  $C=1/5 \Rightarrow y = r + 2.5$



- **El lazo abierto no es capaz de rechazar la perturbación**

# PI. Control en lazo cerrado

- Propiedad #2: **Rechazo de perturbaciones no medibles**
  - Supongamos  $P = 5$  (sin incertidumbre) y  $d=0.5$
  - Si  $C$  es tal que  $PC \gg 1 \Rightarrow y \cong r + (1/C) \cdot d$
  - Ej:  $C=10 \Rightarrow y = (50/51) \cdot r + (5/51) \cdot d$
  - El lazo cerrado es capaz de rechazar perturbaciones sin medirlas



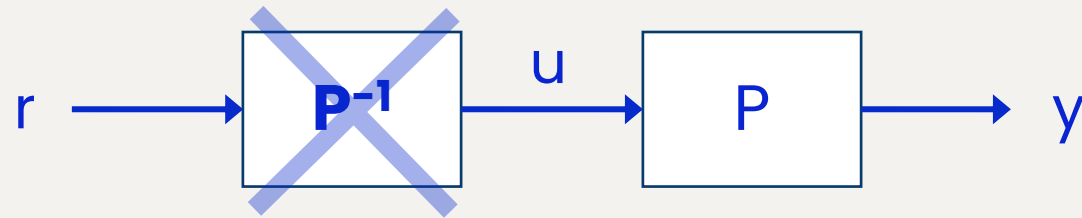
$$y = \frac{PC}{1 + PC} r + \frac{P}{1 + PC} d$$



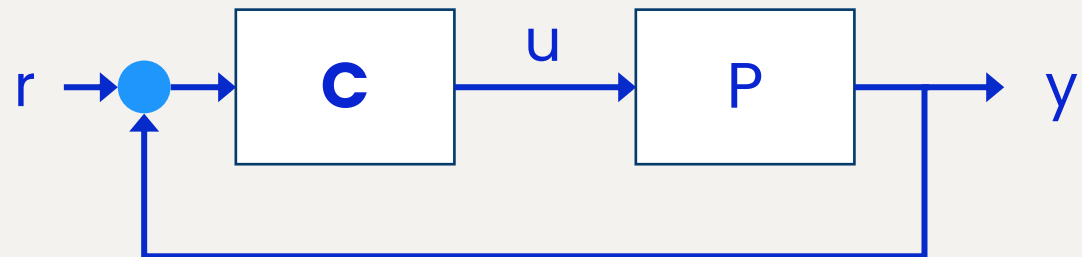
# PI. Control en lazo cerrado

- Otras consideraciones...

- Los sistemas a controlar son dinámicos. No es posible implementar  $C=P^{-1}$



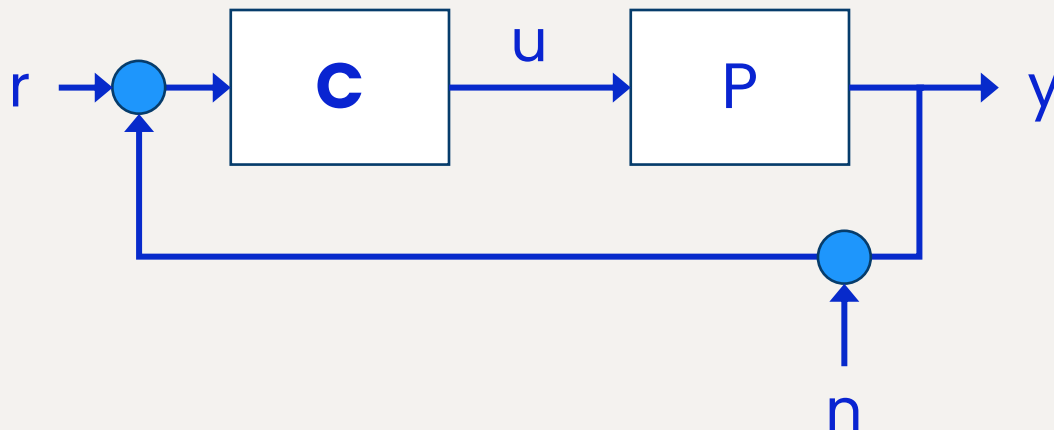
- El lazo cerrado “calcula” la inversa de  $P$  sin conocer  $P$  ( $y \cong r$ )



$$\frac{y}{r} = \frac{PC}{1 + PC} \cong 1$$

# PI. Control en lazo cerrado

- Otras consideraciones...
  - El lazo cerrado es capaz de controlar sistemas de naturaleza inestable
  - Un mal diseño de **C**...
    - puede desestabilizar el sistema a controlar, puede saturar los actuadores
    - puede amplificar el ruido
    - puede aumentar innecesariamente el consumo energético



$$y = \frac{PC}{1 + PC} r - \frac{PC}{1 + PC} n$$

# PI. Control en lazo cerrado

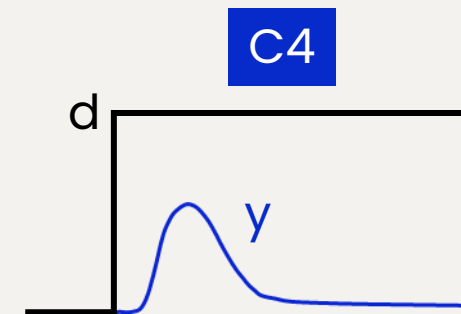
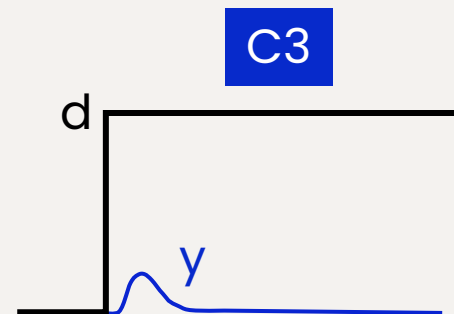
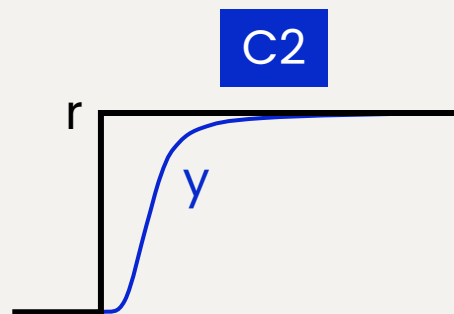
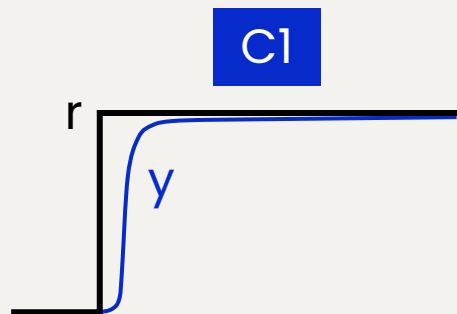
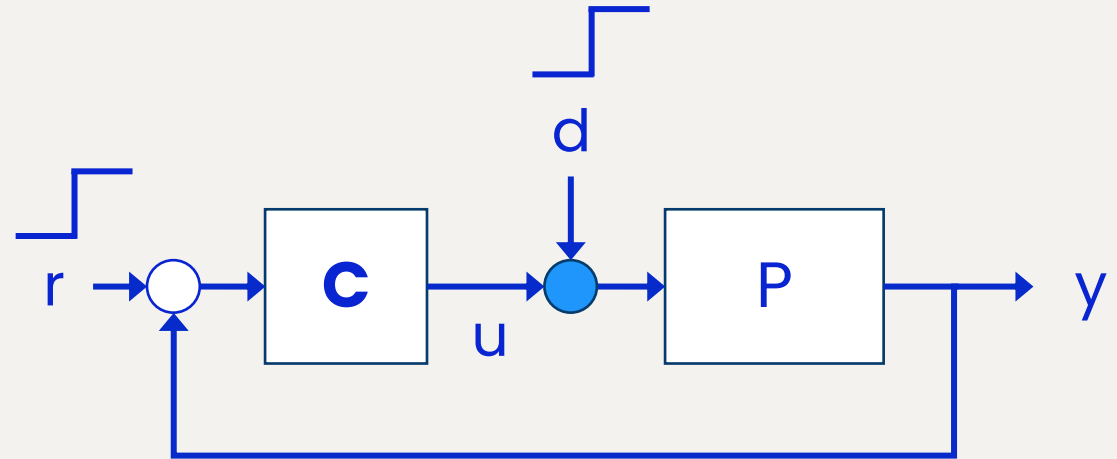
- Diseño de **C**

- Tipos de problemas de control

- Seguimiento de referencia
- Rechazo a perturbaciones

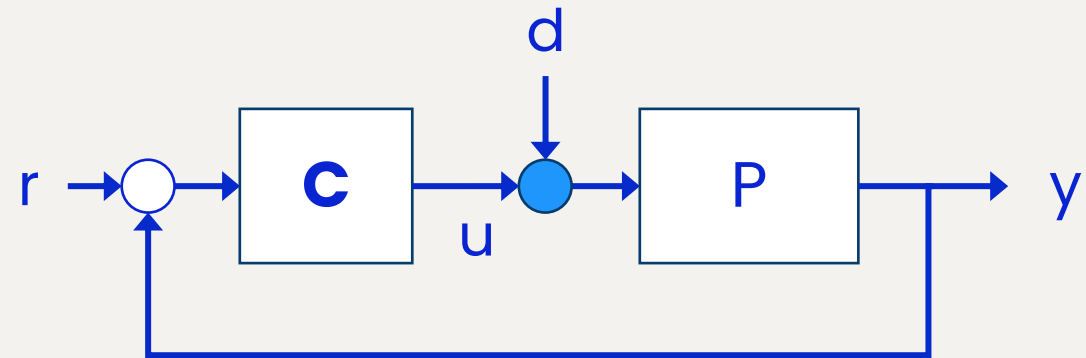
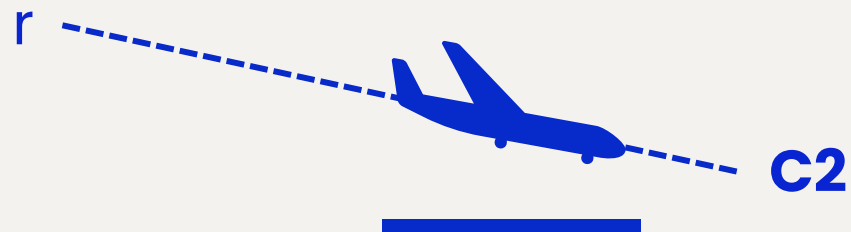
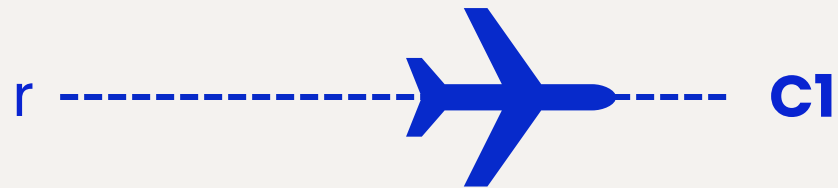
- Definir especificaciones

- Tiempo de subida, sobre impulso, tiempo de establecimiento, etc.
- Influencia directa en el consumo energético



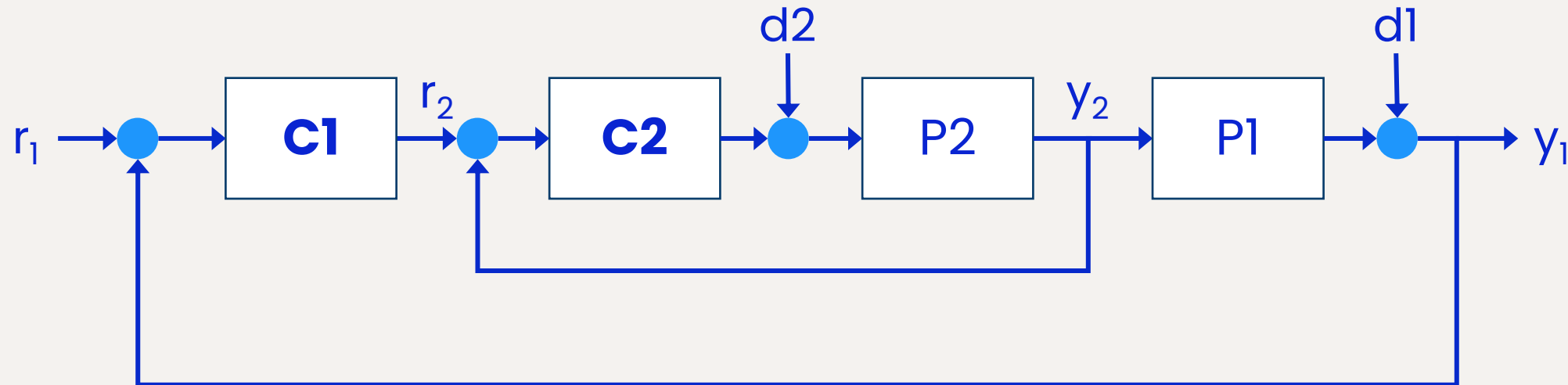
# PI. Control en lazo cerrado

- Diseño de **C**



# PI. Control en lazo cerrado

- Estructura de control en cascada
  - Lazo interno debe ser más rápido que el lazo externo
  - Mejor gestión de las **perturbaciones**



**1. Control en lazo cerrado**

**2. Fangos Activos convencionales**

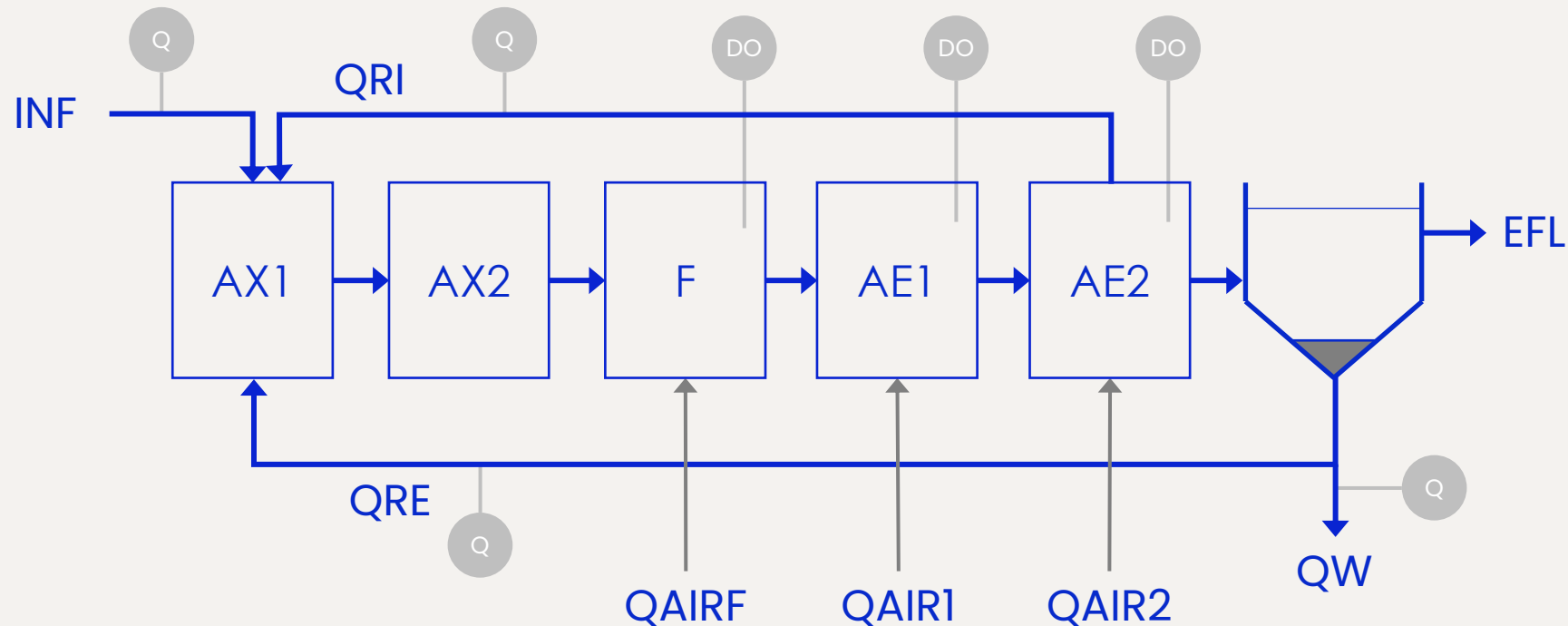
**3. SBR, BRM, Lecho móvil, Digestión anaerobia**

**4. Aspectos prácticos del control e Inteligencia Artificial**

# P2. Fangos activos convencionales

- **Pasado:** **Automatización**

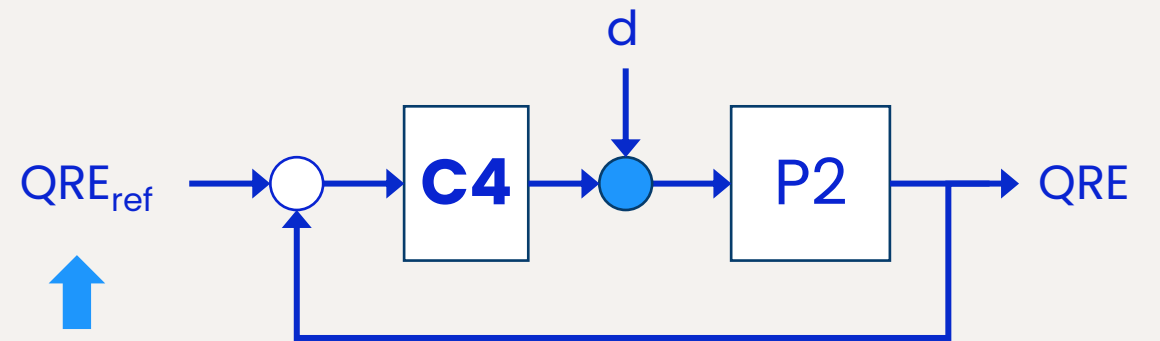
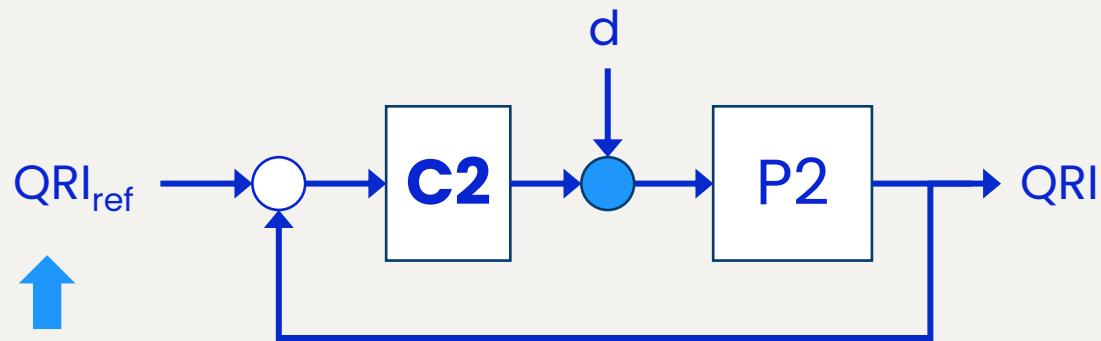
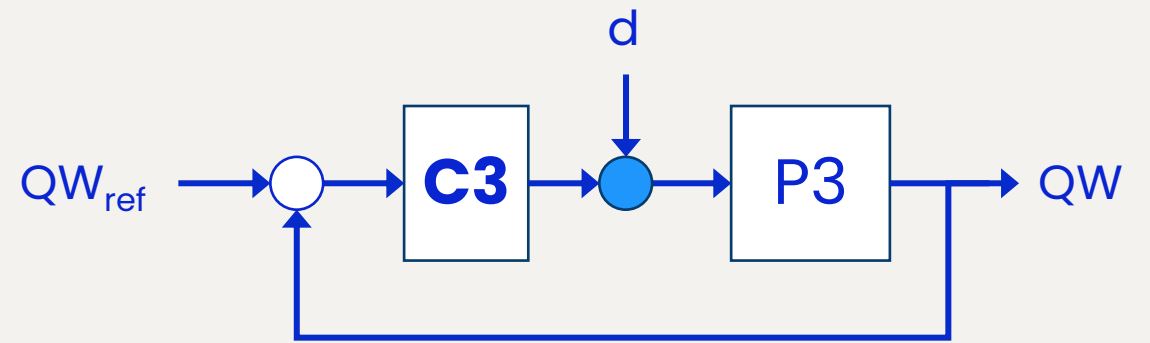
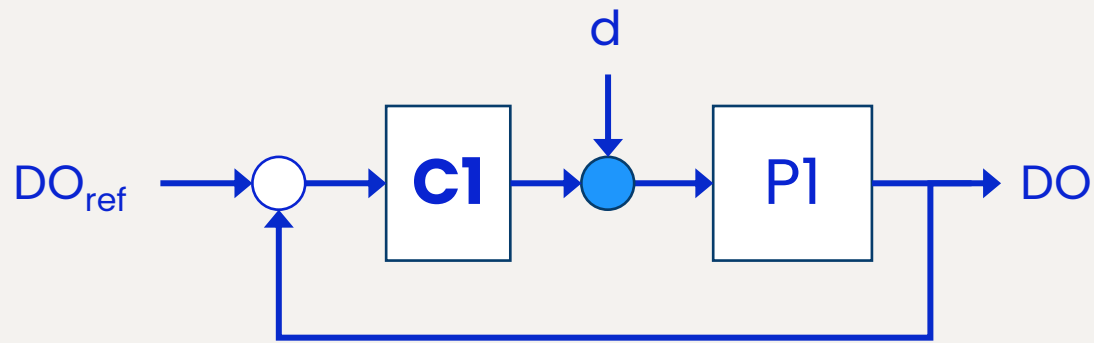
- Lazo cerrado para actuaciones básicas (DO, QRI, QRE, QW)  $\Rightarrow$  **Control primario**
- Diseño del control primario: **rechazo de perturbaciones**



# P2. Fangos activos convencionales

- **Pasado:** **Automatización**

- Las referencias se asignan **manualmente** desde el SCADA de planta



$\propto$  QINF

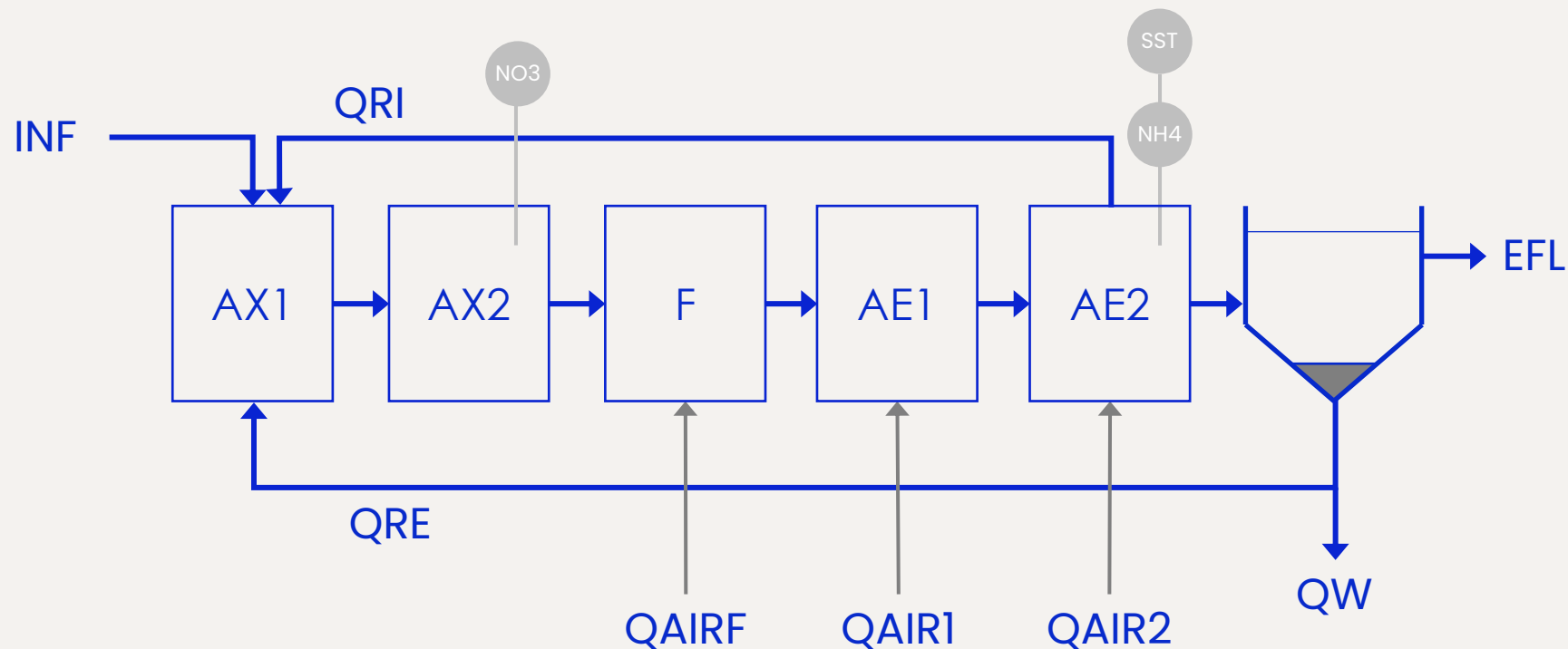
$\propto$  QINF



## P2. Fangos activos convencionales

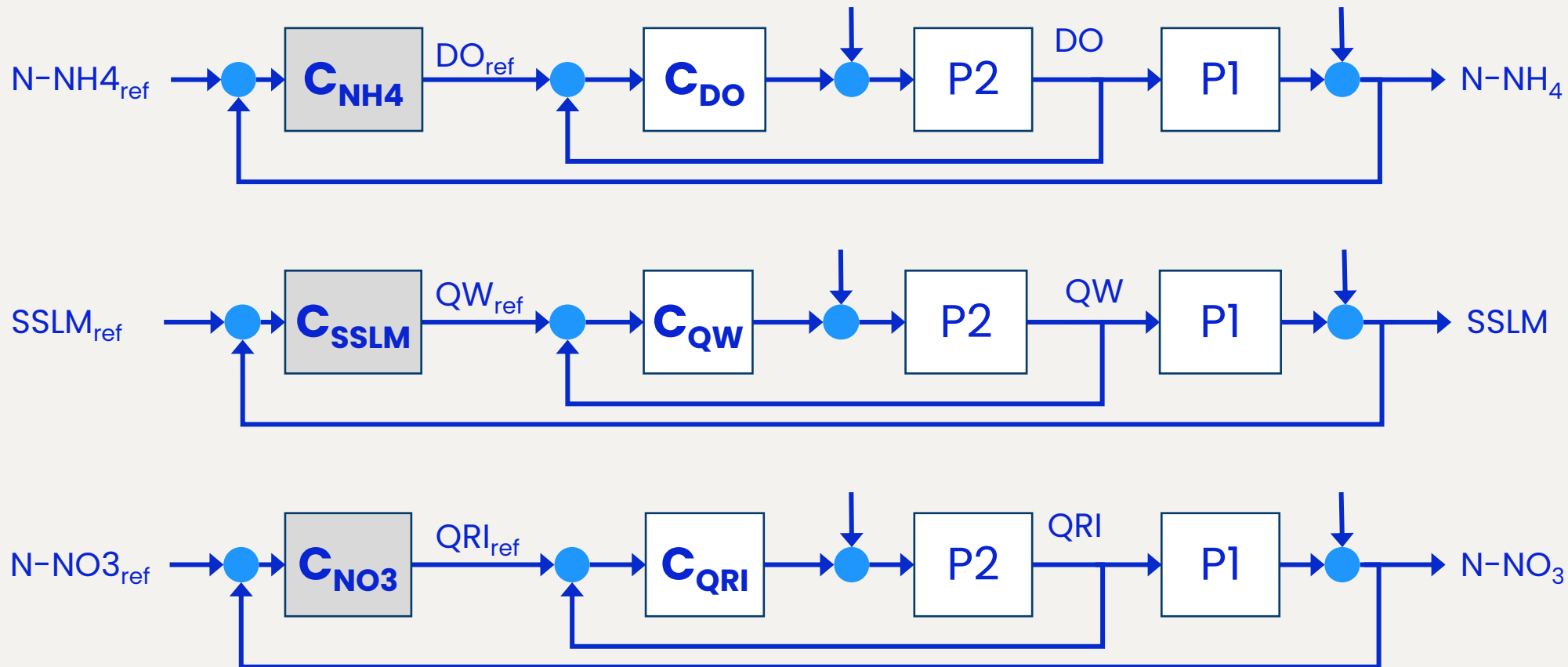
- **Presente:** Control automático

- Las referencias de los lazos de control primario se asignan **automáticamente** por lazos de control superior
  - Control en cascada, nuevas referencias de control



## P2. Fangos activos convencionales

- **Presente:** Control automático



# P2. Fangos activos convencionales

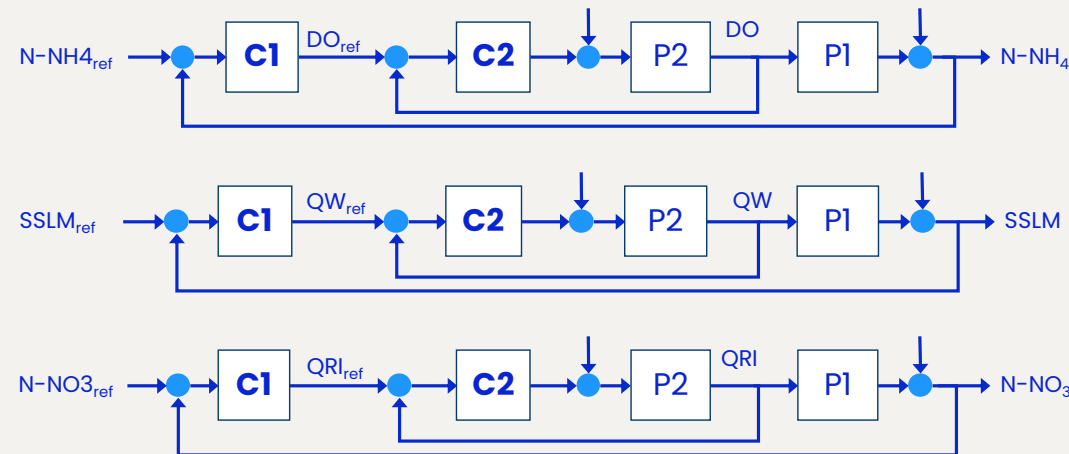
- **Presente:** Control automático

- **Diseño óptimo** de controladores automáticos

- **Conocimiento sólido del dominio** (Nitrificación, Desnitrificación, etc.)
- Técnicas CCD (Control Co-Design)
- Técnicas de control robusto

- Definición de objetivos de control (especificaciones)

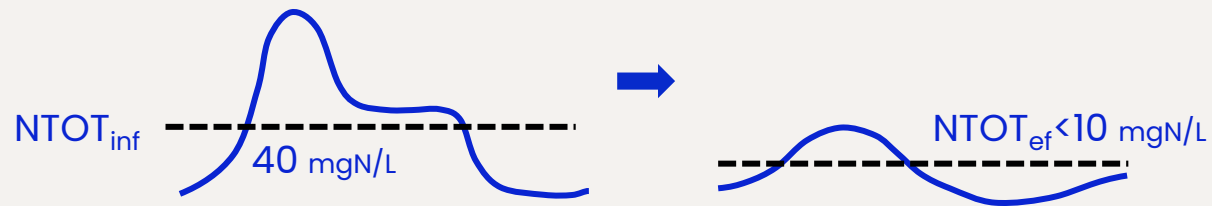
- Estabilidad del proceso
- Calidad del efluente
- Consumo energético



# P2. Fangos activos convencionales

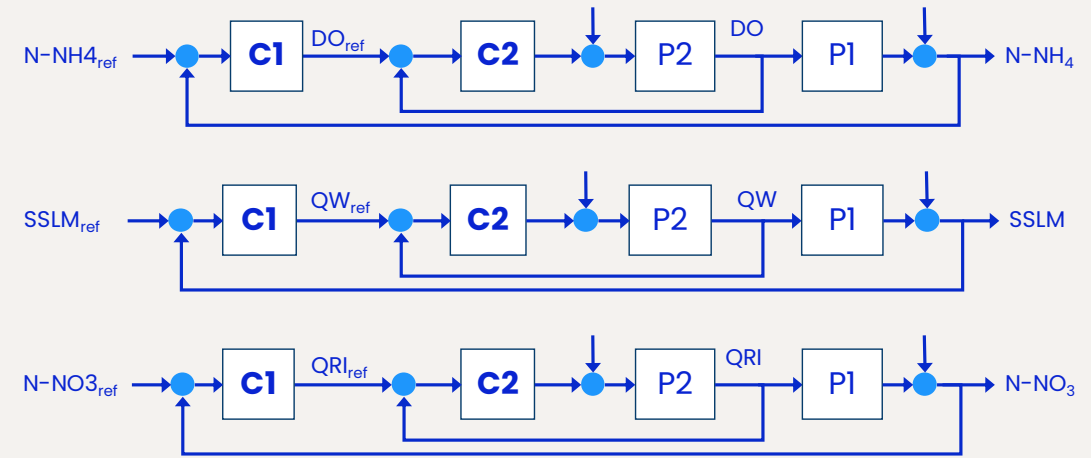
- **Presente: Control automático**

- Problema de rechazo de perturbaciones



- Solución Diseño-Control integrado (CCD)

- Líneas gemelas
- Volumen  $\Rightarrow$  rechazar la variabilidad horaria
- Biomasa nitrificante + DO  $\Rightarrow$  rechazar variaciones en la carga media diaria de N
  - Caso especial: zonas facultativas (aumento brusco de la biomasa nitrificante activa)



# P2. Fangos activos convencionales

- **Presente:** Control automático

Operación con consignas de referencia constantes:

- **Control de SSLM**

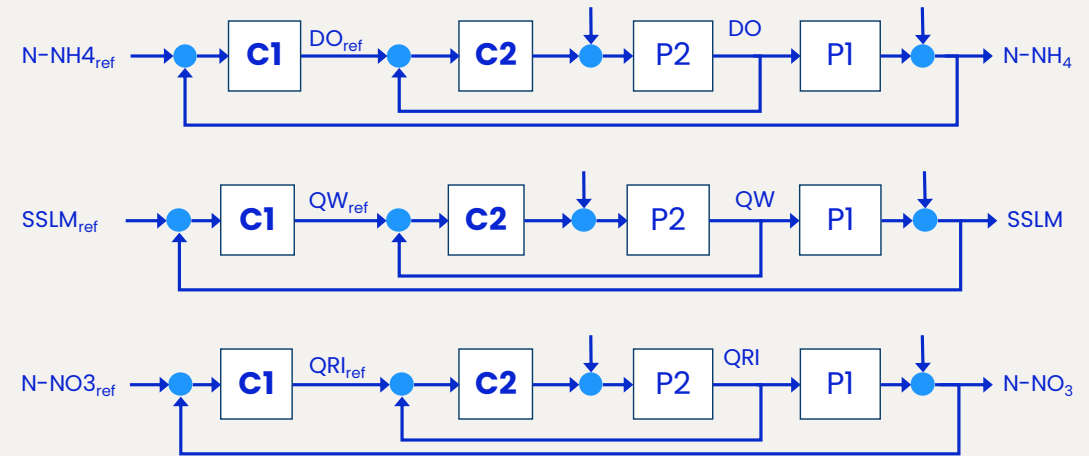
- La biomasa nitrificante disminuye cuando la carga orgánica aumenta
- La biomasa nitrificante aumenta cuando la temperatura aumenta

- **Control de N-NO<sub>3</sub>**

- Zona facultativa anóxica (bajos nitratos)

- **Control de N-NH<sub>4</sub>**

- Desfase entre N-NO<sub>3</sub> en último tanque aerobio y DQO<sub>b</sub> en influente



- **Perturbaciones internas**

- QRE  $\Rightarrow$  trasvases de sólidos del manto de lodos a los reactores
- QW  $\Rightarrow$  efecto negativo en la línea de fangos

# P2. Fangos activos convencionales

- **Caso real:** EDAR de Ranilla
  - 350.000 he
  - 4 líneas
  - 4 reactores aerobios por línea
  - Eliminación de P
  - Lazos de control **CIMICO**
    - Control de  $\text{N-NH}_4$
    - Control de SSLM
    - Control de  $\text{N-NO}_3$
    - Control de Altura del Manto de Lodos
    - Control de  $\text{P-PO}_4$



**1. Control en lazo cerrado**

**2. Fangos Activos convencionales**

**3. SBR, BRM, Lecho móvil, Digestión anaerobia**

**4. Aspectos prácticos del control e Inteligencia Artificial**

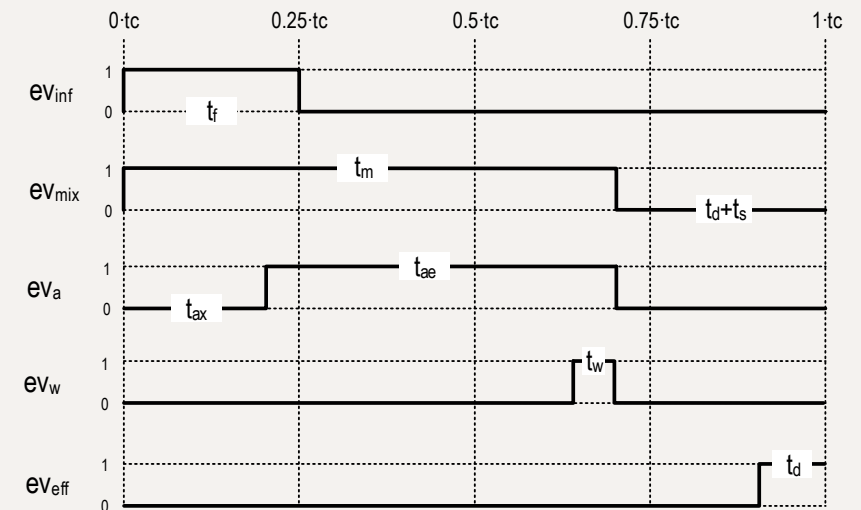
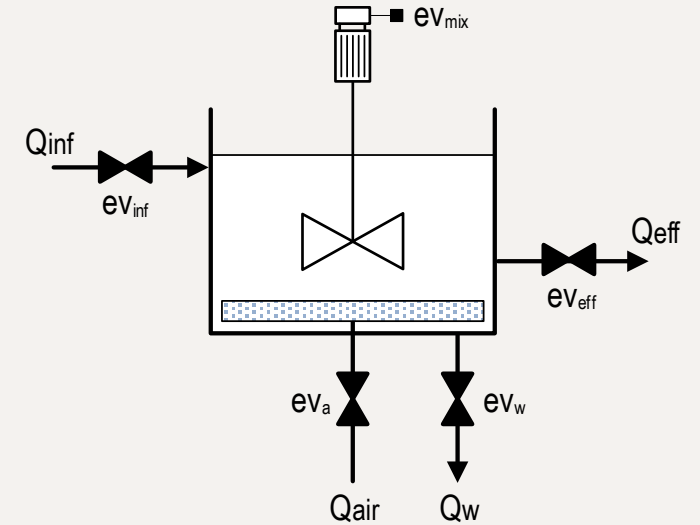
# P3. Control de procesos SBR



- Compacidad, flexibilidad operacional
- Desacoplo hidráulico y biológico
- Observación indirecta del agotamiento de amonio y nitrato



- Gestión hidráulica de caudales elevados (lluvias)
  - Sincronización hidráulica
- En plantas grandes el número de SBRs puede ser muy alto
- Dificultad para reducir picos de amonio
- Efectivos en aguas industriales
  - Q bajo + tanques de almacenamiento





# P3. Control de procesos SBR

- Control de procesos secuenciales SBR

- Variables de control

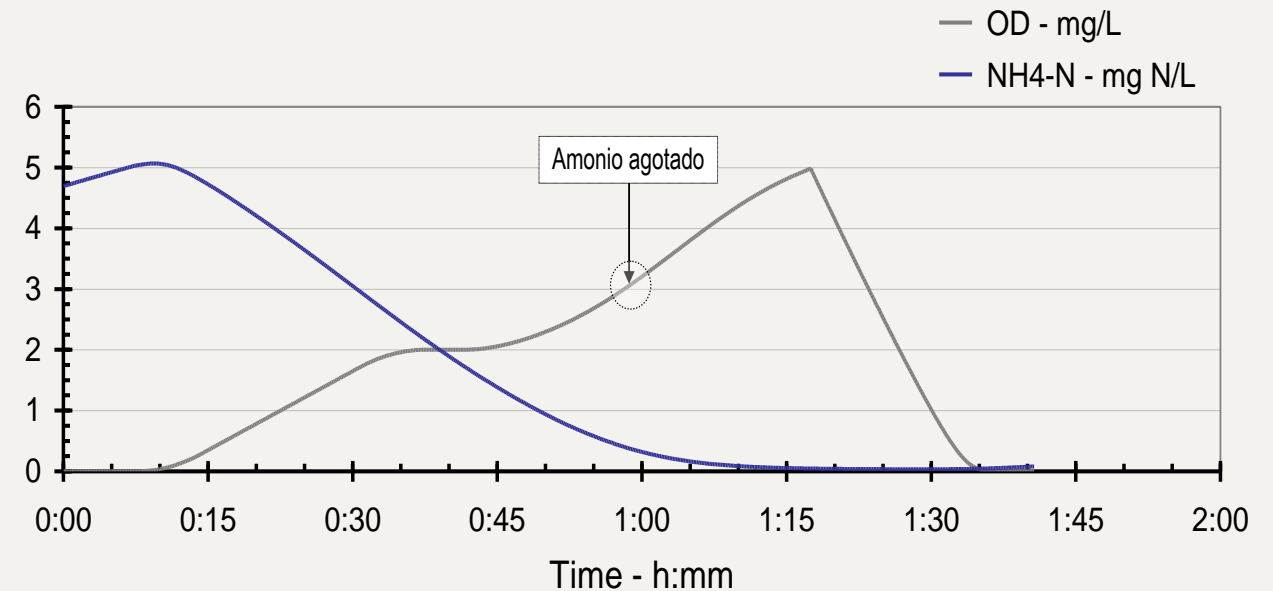
- Duración del ciclo:  $T_{ciclo}$  (tanque de almacenamiento previo)
- Duración de las fases de reacción:  $T_{anox}$ ,  $T_{aer}$  (ORP/N- $NO_3$ , DO/N- $NH_4$ )
- $Q_w$  (Control de la masa de sólidos)

- Promover **N/D simultánea**

- Rampa de OD
- Alternar fases anóxicas/aerobias
- Alimentación escalonada

- Control **feedforward**

- Basado en la carga de N



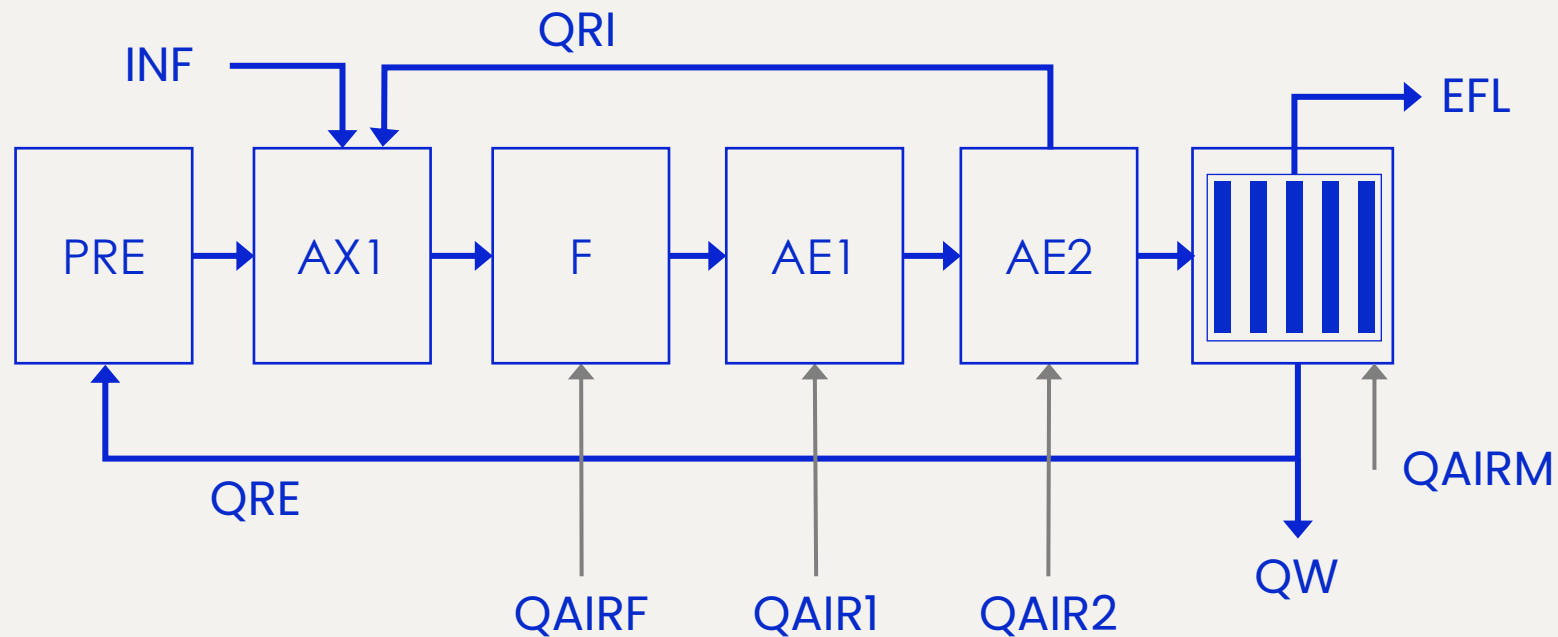
# P3. Control de procesos SBR

- Caso real: EDAR de Fuenteheridos
  - 1000 he
  - 2 SBRs en paralelo
  - Aireación prolongada
  - $NT_{ef} < 20 \text{ mg N/L}$
  - Control automático basado en medidas online de N-NH<sub>4</sub>, N-NO<sub>3</sub>, DO y SSLM
    - Fase 1: SBR con fango activo
    - Fase 2: SBR IFAS



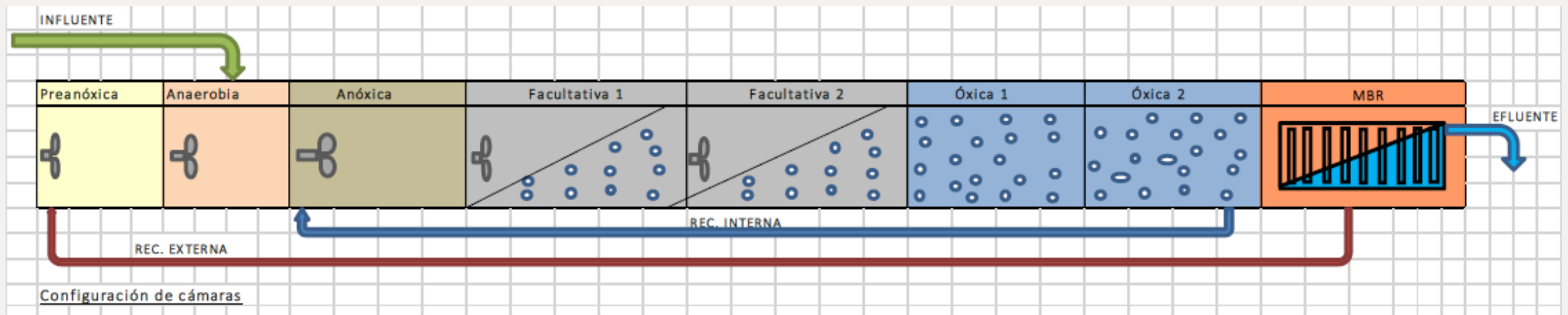
## P3. Control de procesos BRM

- Gradientes de sólidos en reactores biológicos (QRE)
  - Control de Masa de sólidos (SSLM en QRE)
- Aireación en el tanque de membranas (QAIRM)
  - Amonio residual



# P3. Control de procesos BRM

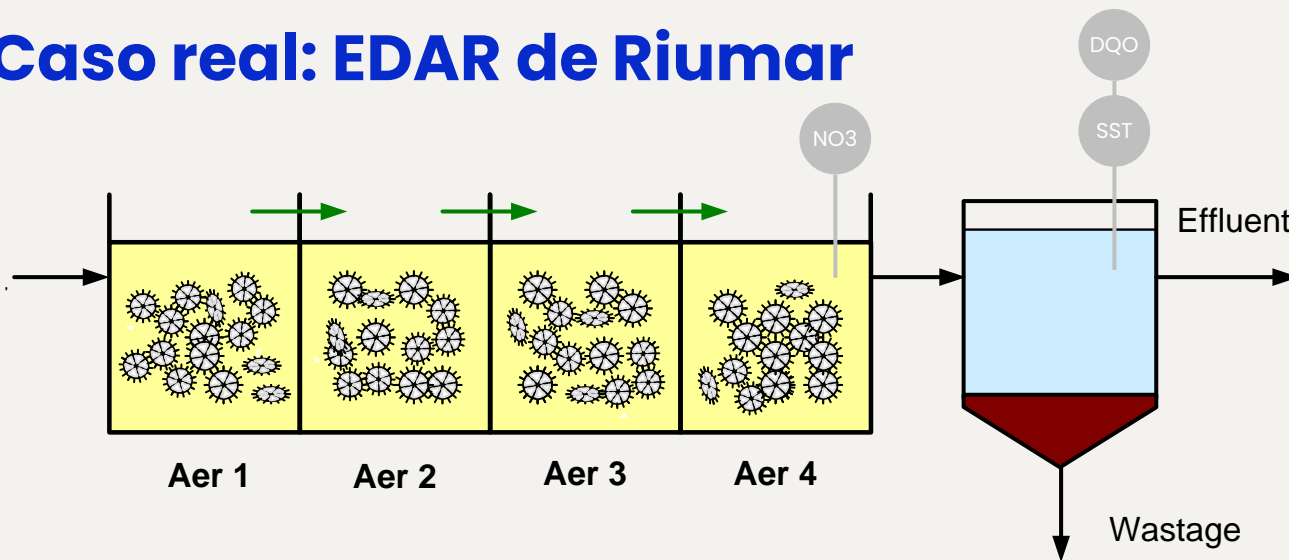
- Caso real: **EDAR de Silvouta**
  - 300000 he
  - Eliminación de N y P
  - Licitación de contrato de nueva obra



# P3. Control de procesos MBBR

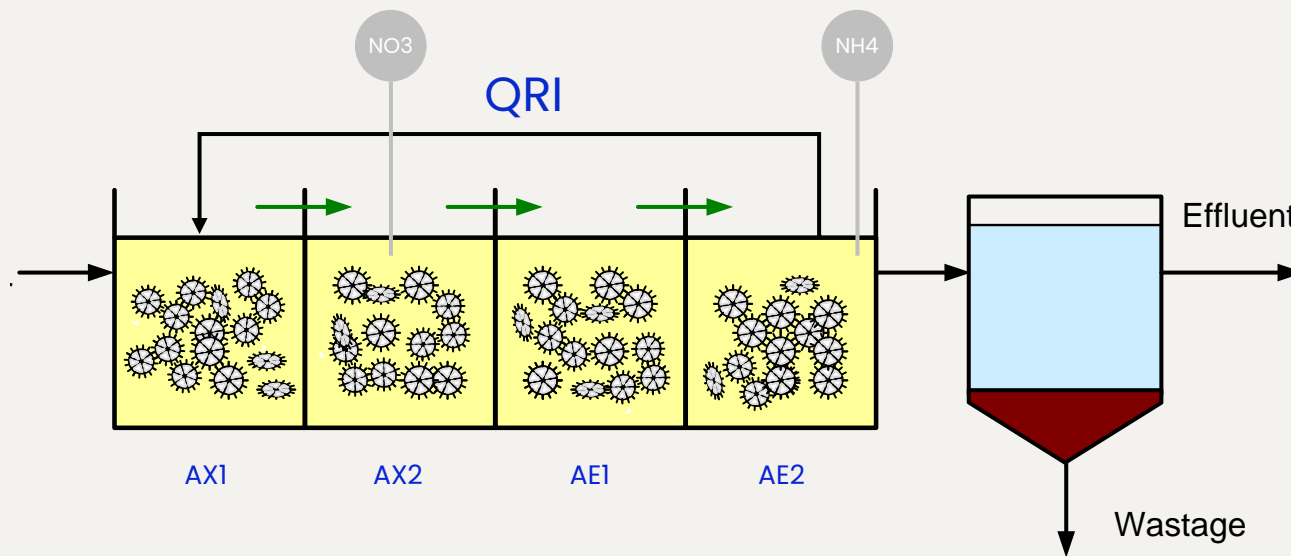
- Eliminación de M.O
  - MBBR puro (sin recirculación de fangos – **SRT = HRT**)
    - Agua urbana: prevenir nitrificación, fango ascendente (DO – DQO)
    - Agua industrial: optimizar la eliminación de DQO en suspensión y en biopelícula

## • Caso real: EDAR de Riumar



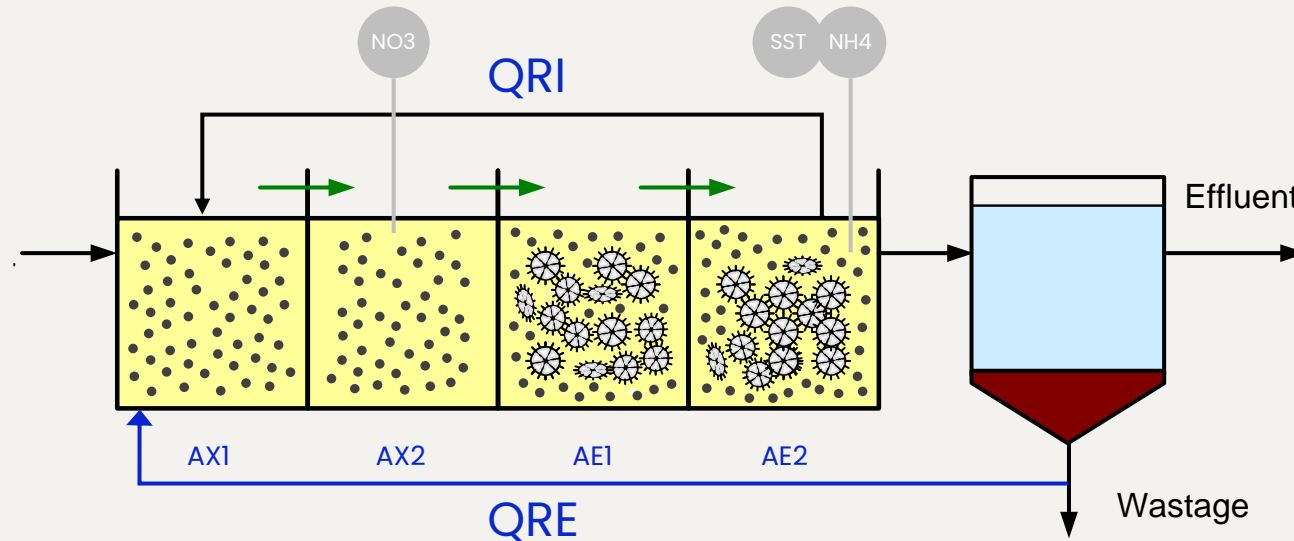
# P3. Control de procesos MBBR

- Eliminación de N
  - MBBR puro (sin recirculación de fangos - **SRT = HRT**)
    - Minimizar crecimiento de XH en biopelícula en el tanque aerobio (**QRI**)
    - Maximizar desnitrificación en biopelícula (N/D simultánea)



# P3. Control de procesos MBBR

- Eliminación de N
  - MBBR IFAS (con recirculación de fangos – **SRT > HRT**)
    - Optimizar el SRT anóxico
    - Promover N/D simultánea
- **Caso real: EDAR de Unitex**
  - Control automático de **N-NH<sub>4</sub>**, **N-NO<sub>3</sub>** y de **TIN<sub>ef</sub>**



# P3. Control de digestores anaerobios

- **EDAR urbanas**

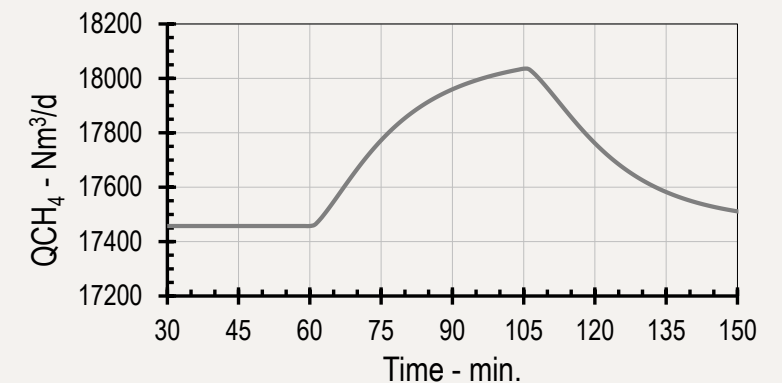
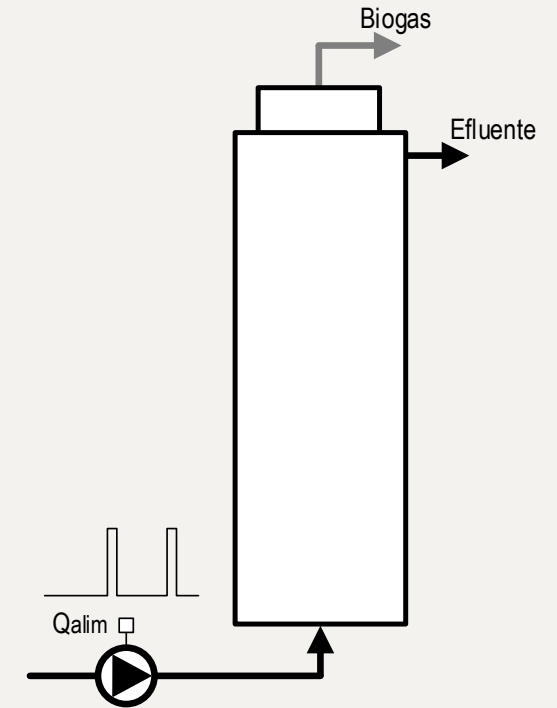
- Sin retención de biomasa
- DQO biodegradable particulada
  - Hidrólisis limitante
- Maximizar la producción de biogás
  - Hidrólisis térmica
  - Co-digestión
  - Aumentando fango primario + fango secundario menos estabilizado
- Producción instantánea VS producción a medio-largo plazo
  - Gestión de tanques de almacenamiento
  - Diseño - Control integrado



# P3. Control de digestores anaerobios

- **EDAR industriales**

- Con retención de biomasa (UASB, IC, etc.)
- El problema de control no es de seguimiento de referencia sino de **búsqueda de extremos**
- DQO fundamentalmente soluble
  - Riesgo de acidificación por sobrecarga orgánica
- Variable manipulable: caudal de alimentación
  - Basado en medida online de VFA
  - Basado en aplicación de pulsos controlados



**1. Control en lazo cerrado**

**2. Fangos Activos convencionales**

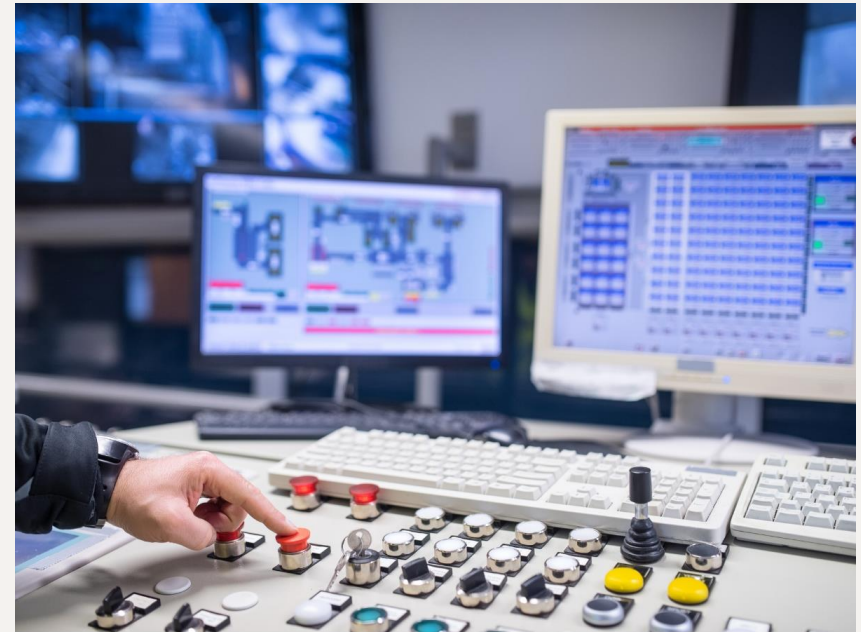
**3. SBR, BRM, Lecho móvil, Digestión anaerobia**

**4. Aspectos prácticos del control e Inteligencia Artificial**

# P3. Aspectos prácticos del control

- **Programación del software de control**

- Algoritmos  $u(n) = u(n - 1) + a \cdot e(n) + b \cdot e(n - 1) + \dots$ 
  - Robustez numérica: estructuras en cascada
  - Adaptable a particularidades de la planta
- Robustez del código:
  - test unitarios offline
- Distribución ágil:
  - Métodos CI/CD
  - Distribución remota



# P3. Aspectos prácticos del control

- **Integración con PLC/SCADA**

- Librería de conectores (OPC-DA, OPC-UA, Profibus, Modbus, Ethernet/IP, FINS)
- Modificaciones en PLC de planta
- Modificaciones en GUI de planta

- **Gestión remota de máquinas**

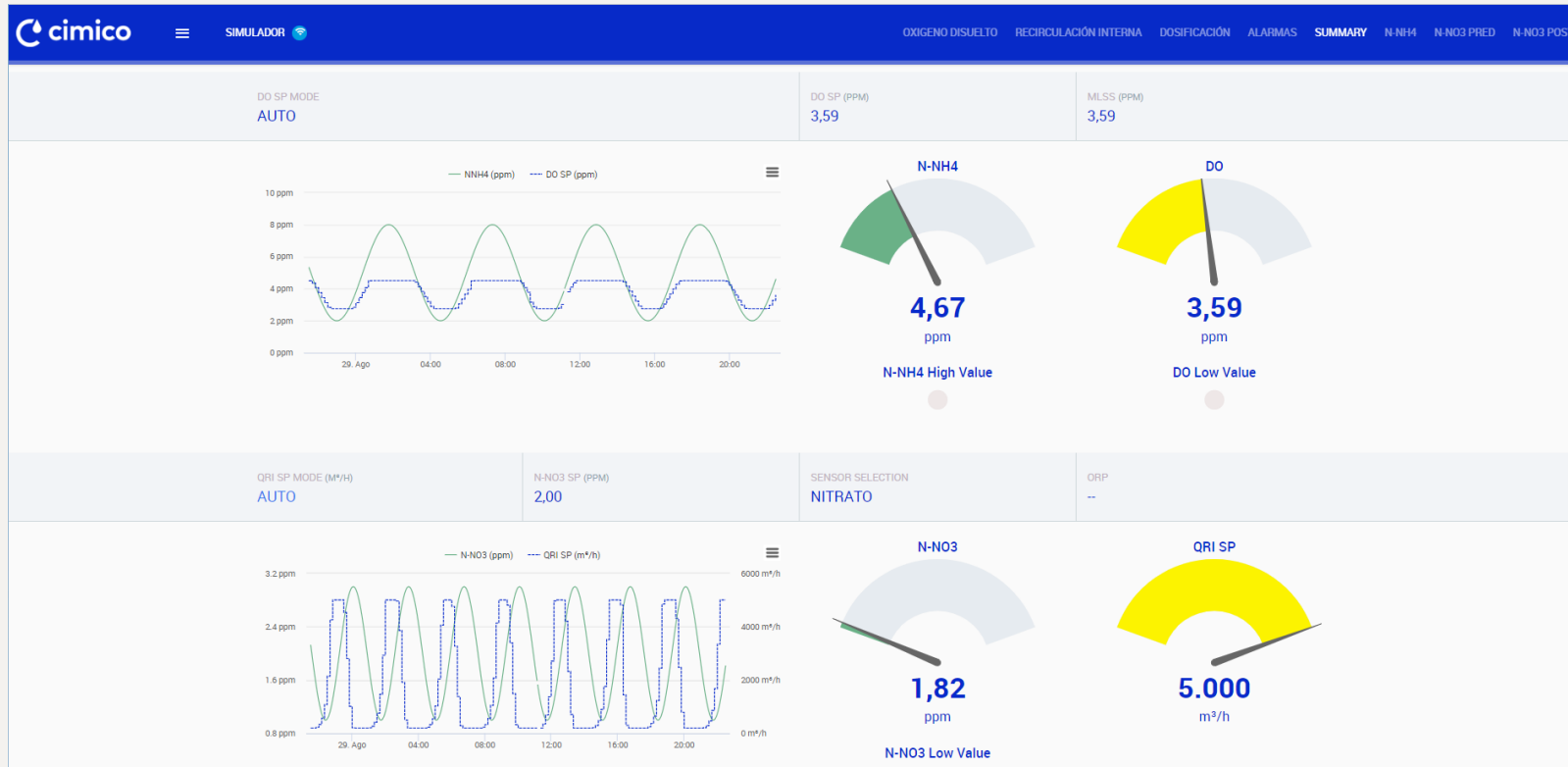
- Teleservice, gestión de variables, gestión de usuarios, diseño de UI, etc.

- **Gestión remota de controladores**

- Sintonización de controladores
- Análisis de prestaciones

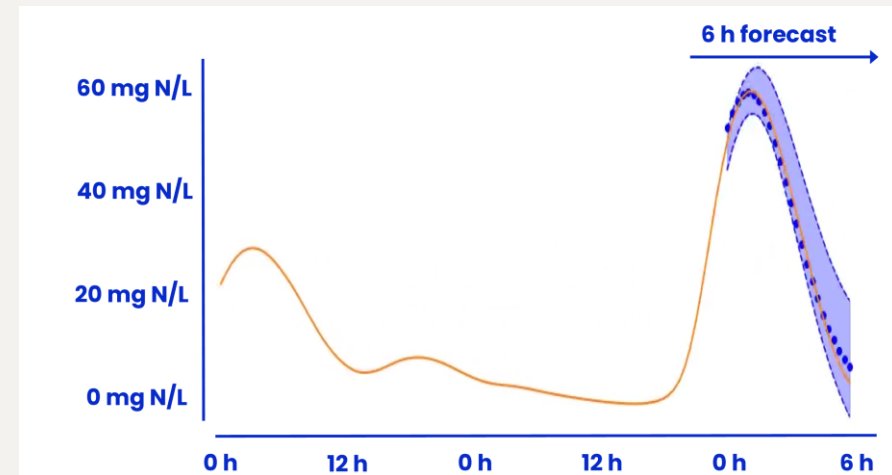
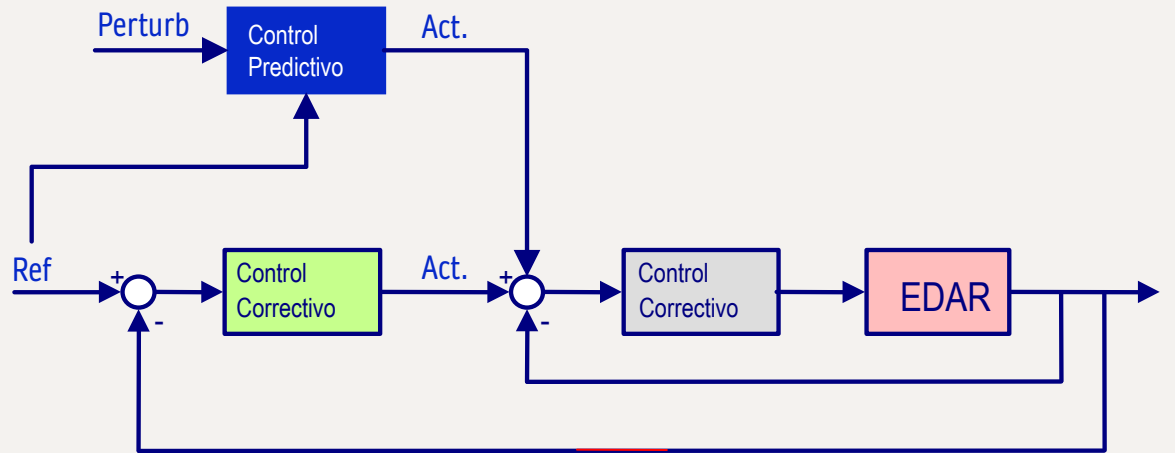
# P3. Aspectos prácticos del control

- Plataforma IIoT



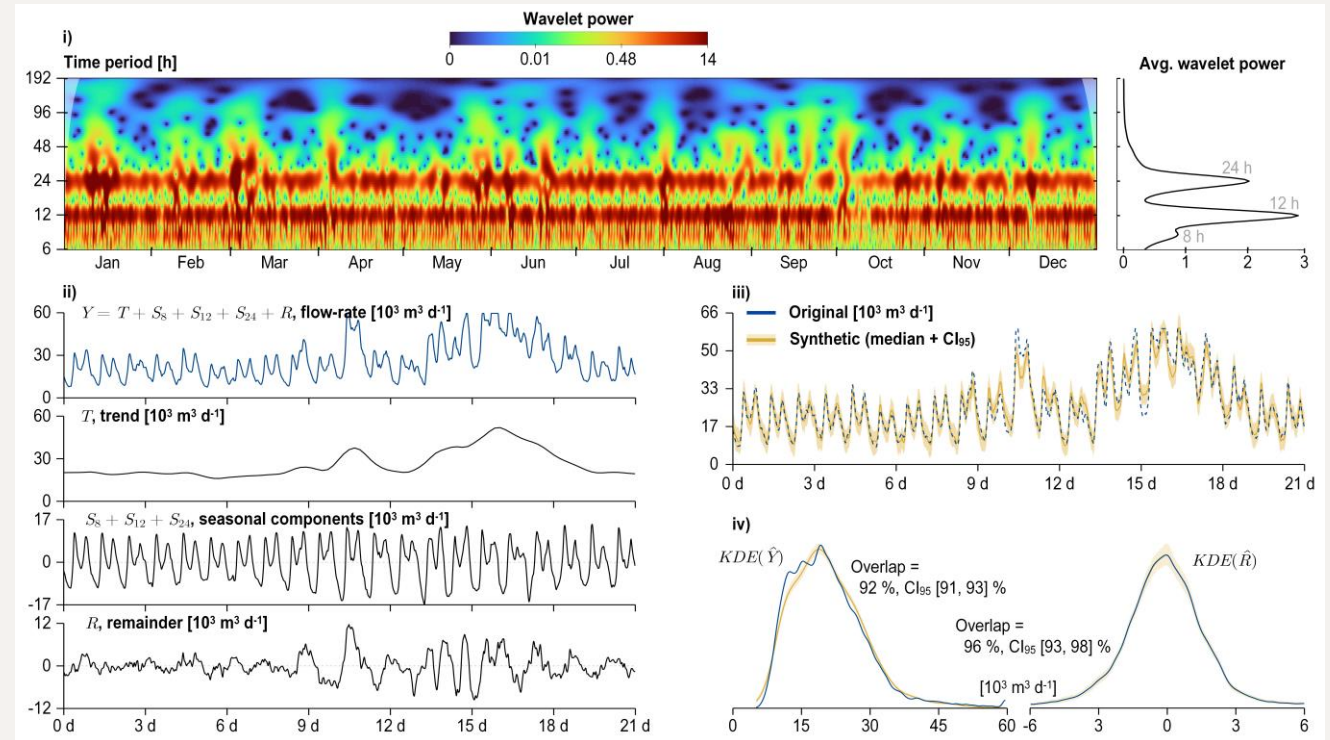
# P3. Futuro: Inteligencia Artificial

- **Función 1:** complementar al control automático
  - Estimar variables de proceso no medibles (**Sensores Software**)
  - Detectar fallos / anomalías / ataques
  - Predecir perturbaciones
    - Anticipar decisiones
    - Dependencia del modelo de predicción



# P3. Futuro: Inteligencia Artificial

- **Función 2:** generación de datos sintéticos
  - Automatizar simulaciones
  - Testeo offline de modelos ML
  - Privacidad de datos
- **Función 3:** encontrar patrones operacionales
  - Clasificación del agua influente
  - Clasificación del estado de la planta



# P3. Futuro: Inteligencia Artificial

- **Función 4:** sistema de recomendación
  - Recomendaciones automáticas en **tiempo real**
    - Aprendizaje por refuerzo
    - Entrenamiento con simuladores
  - Recomendaciones **diarias** para personal de operación
    - Modelos reducidos (ROM) basados en datos híbridos
    - ROM de planta completa VS ROMs por unidades de tratamiento



# Muchas gracias



**Ion Irizar**

iirizar@cimico.tech



**cimico** “Desde el conocimiento al mercado”



**[www.cimico.tech](http://www.cimico.tech)**