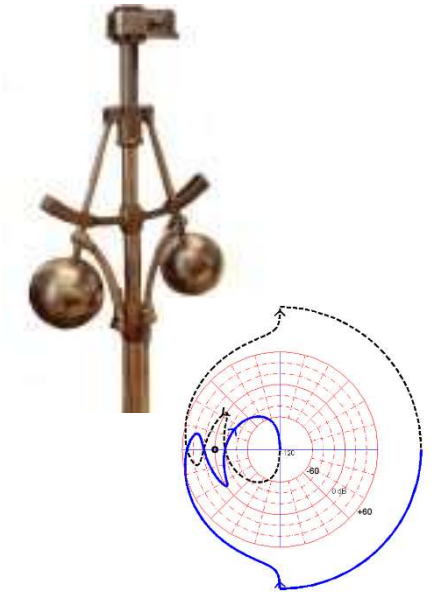
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA
Departamento de Ingeniería Eléctrica

CONTROL AUTOMATICO
Introducción

Miguel Torres Torriti

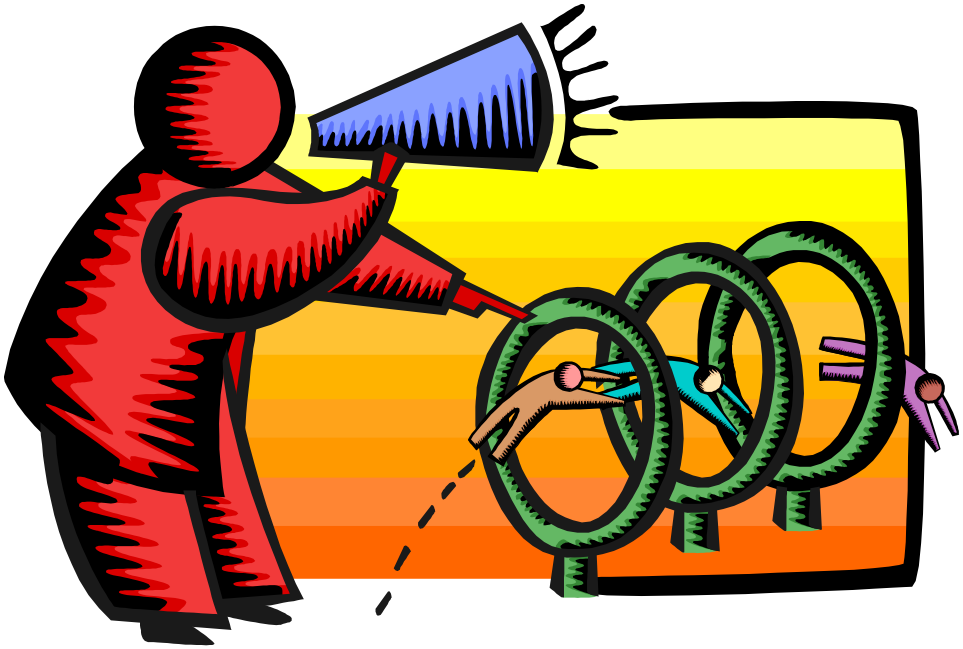


Clase 1: Introducción

- Aspectos Administrativos
- ¿Qué es control automático?
- ¿Por qué implementarlo y que beneficios trae?
- ¿Cuáles son sus orígenes y proyecciones?
- Ejemplos de aplicación
- Notación y antecedentes matemáticos
- Herramientas para el diseño de sistemas de control automático

Información Administrativa

- Revisión del programa del curso publicado en Canvas.
- E-mail profesor: mtorrest@ing.puc.cl, DIE.



¿Qué es control automático?



¿Qué es control automático?

- Un *controlador* (automático) es todo dispositivo que *regula* las funciones de un *sistema* o *proceso* manteniéndolo dentro de ciertos rangos o *especificaciones de operación* sin la necesidad de la intervención de un operador.

- Un *sistema de control* se compone de uno o múltiples *lazos de control*.

¿Por qué usar Sistemas de Control Automático?



OPERATION IRAQI FREEDOM -- An F-117 from the 8th Expeditionary Fighter Squadron out of Holloman Air Force Base, N.M., flies over the Persian Gulf on April 14, 2003. The 8th EFS has begun returning to Hollomann A.F.B. after having been deployed to the Middle East in support of Operation Iraqi Freedom. (U.S. Air Force photo by Staff Sgt. Derrick C. Goode). http://www.af.mil/photos.html.

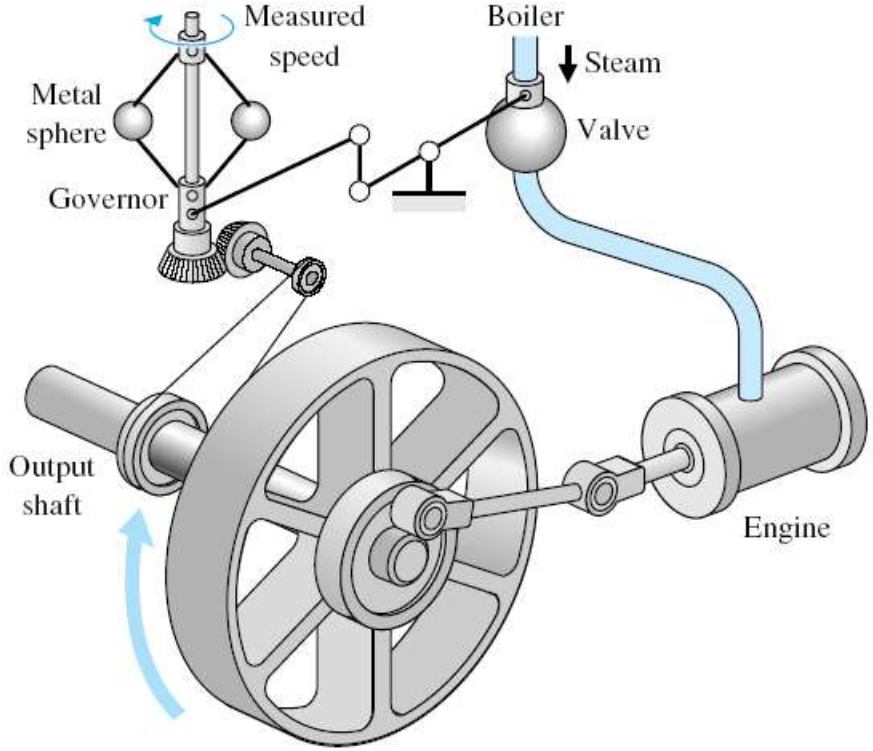
Ejemplos de Aplicaciones del Control Automático (1/2)

- Industria de Manufactura:
  - Controles de velocidad y posición de motores y generadores.
  - Brazos robóticos.
  - Tornos y centros mecanizados CNC (Computer Numerical Control)
- Industria Química – Control de Procesos:
  - Controles de flujo, temperatura, presión.
- Energía y Potencias:
  - Sistemas electrónicos de regulación de voltaje, corriente o frecuencia.

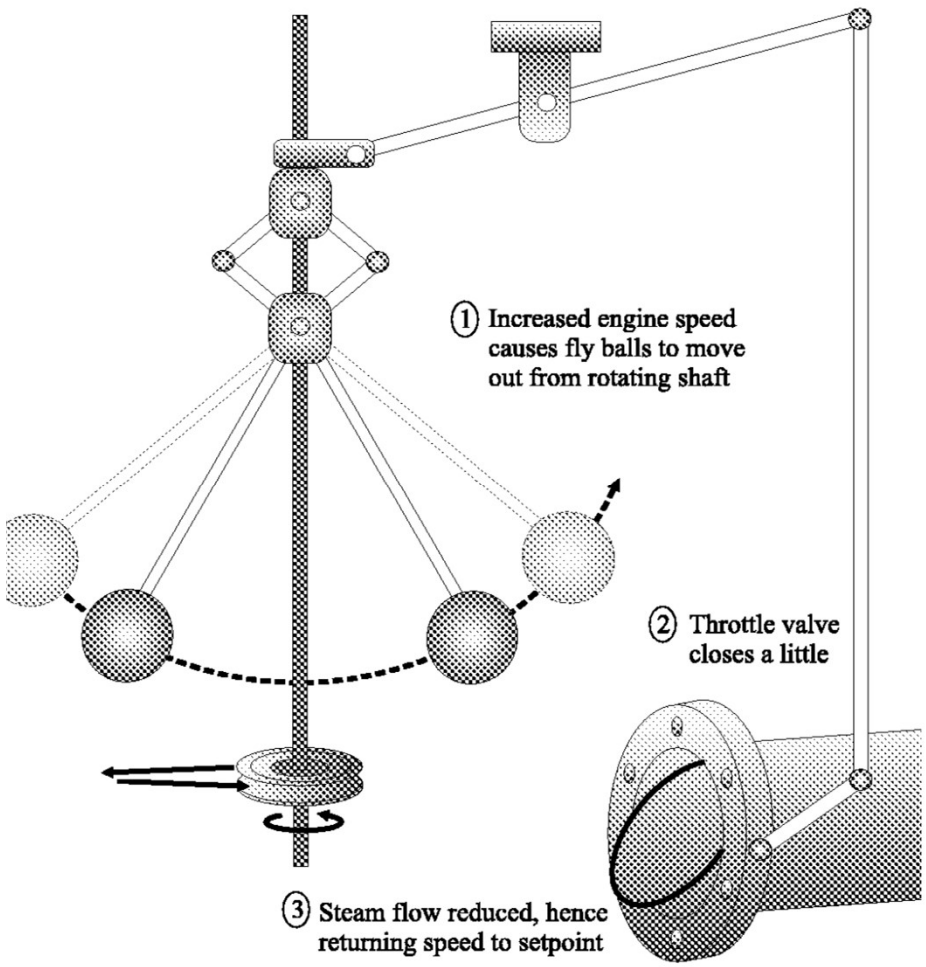
Ejemplos de Aplicaciones del Control Automático (2/2)

- Sistemas Aeronáutica y Aeroespaciales:
  - Sistemas de navegación autónoma y pilotos automáticos.
  - Sistemas de estabilización de cohetes y satélites.
  - Control de tráfico aéreo.
- Telecomunicaciones:
  - AGC (Automatic Gain Control) en receptores y trasmisores.
  - Control de tráfico en redes de datos.
- Otras aplicaciones:
  - Robots móviles.
  - Prótesis y aplicaciones biomédicas.
  - Control de tráfico terrestre.
  - Economía: control de inflación, desempleo, etc.

Regulador Inercial de Watt (Watt's Flyball Governor)

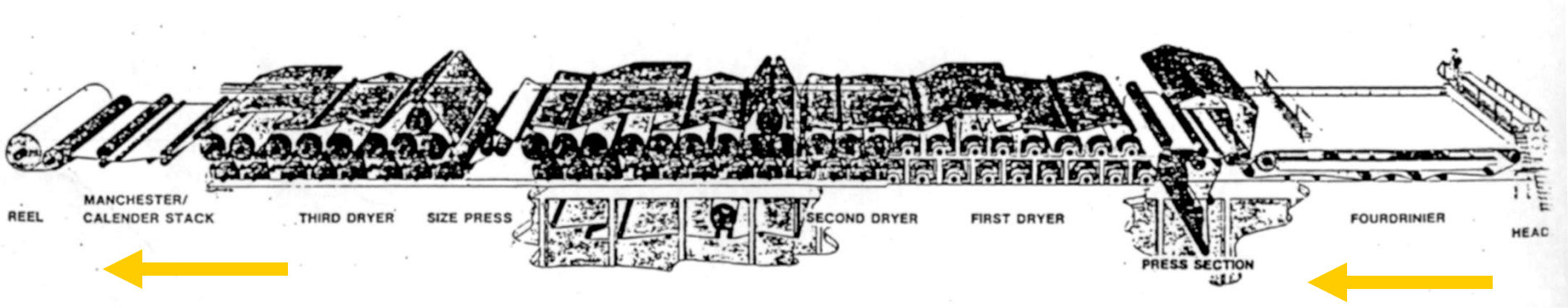


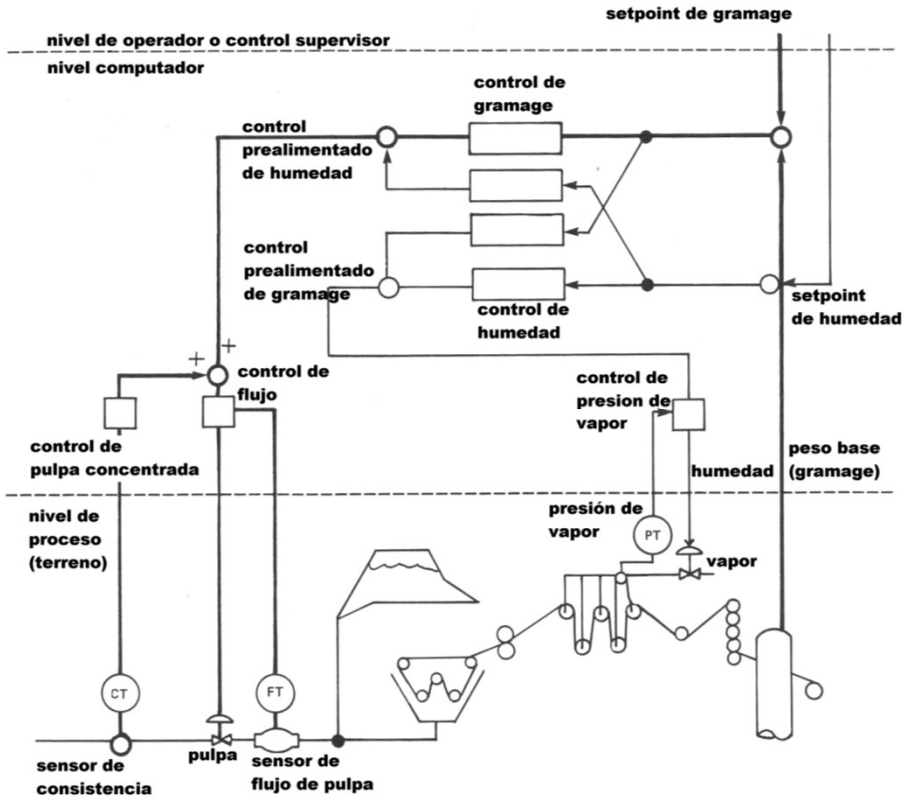
Regulador Inercial de Watt
Fuente: Dorf & Bishop, Modern Control Systems, 9 ed., Prentice Hall, 2001.



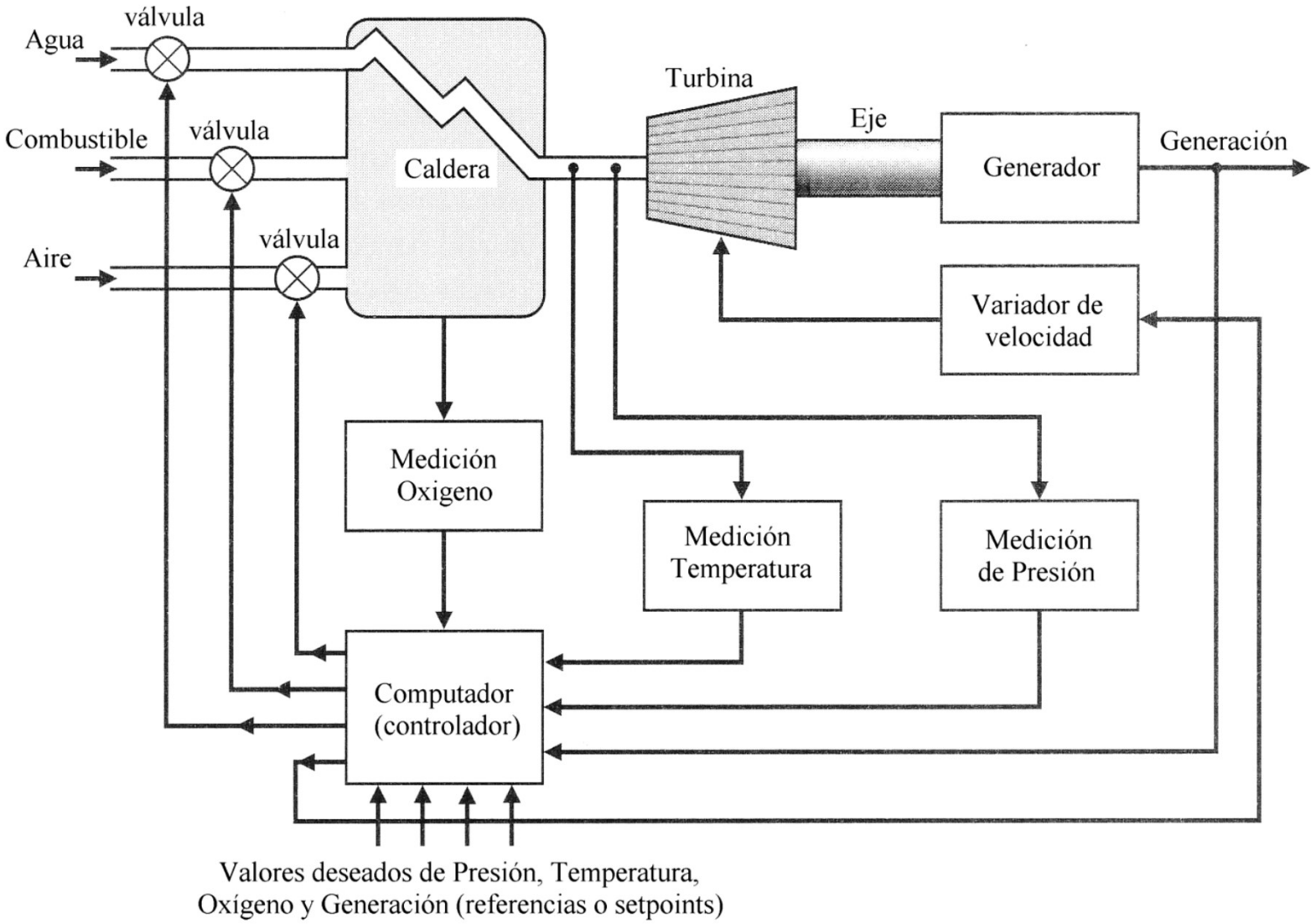
Funcionamiento del Regulador Inercial de Watt
Fuente: Goodwin, Graebe & Salgado, Control System Design, Prentice Hall, 2001.

Niveles de Control: Manufactura del Papel

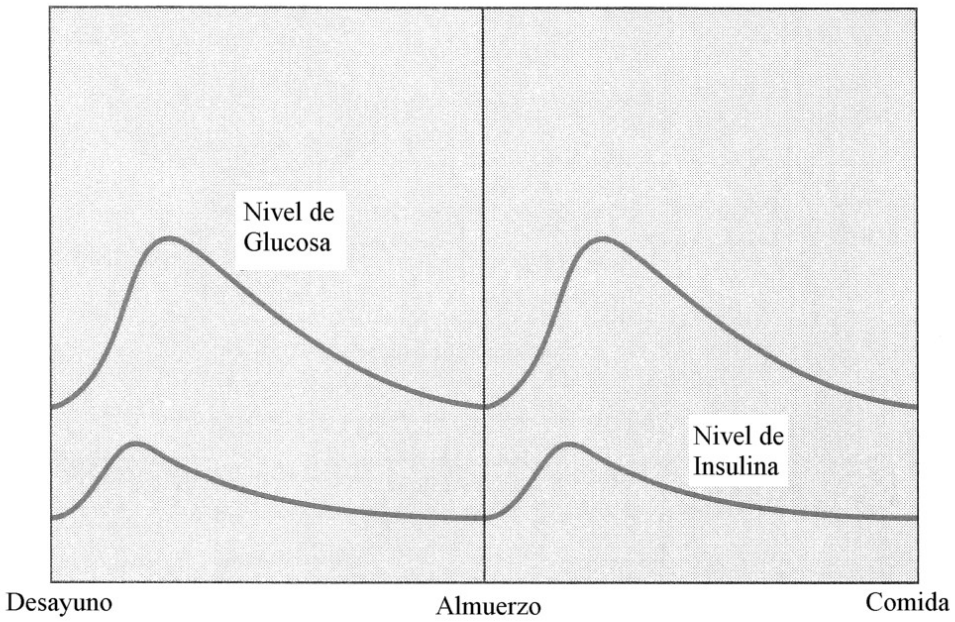


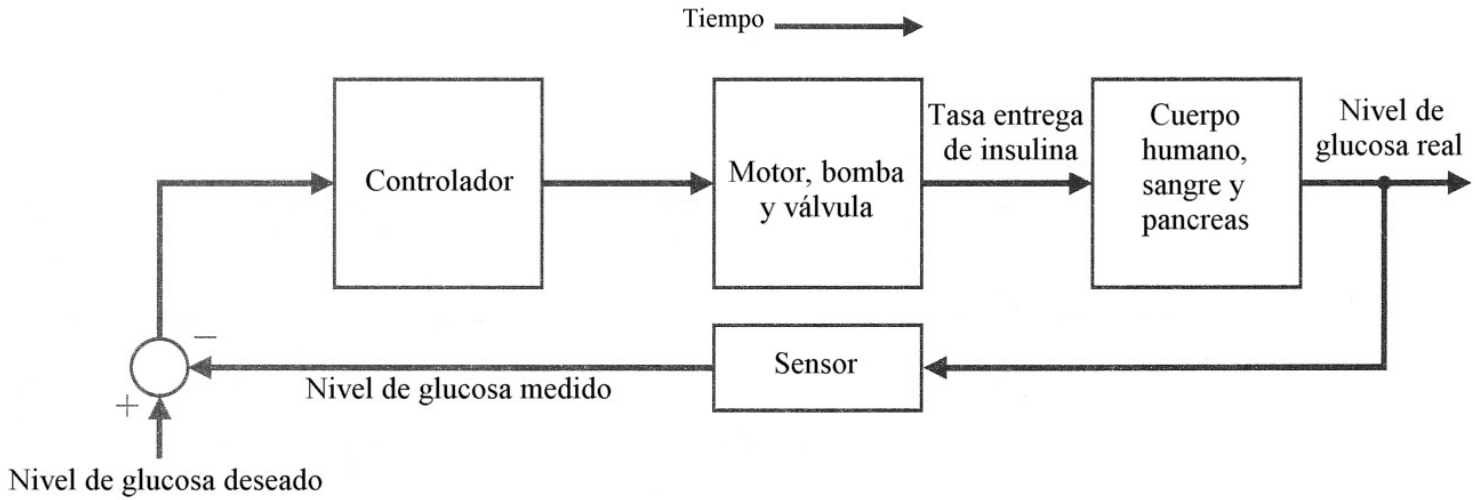


Control de Generación Térmica

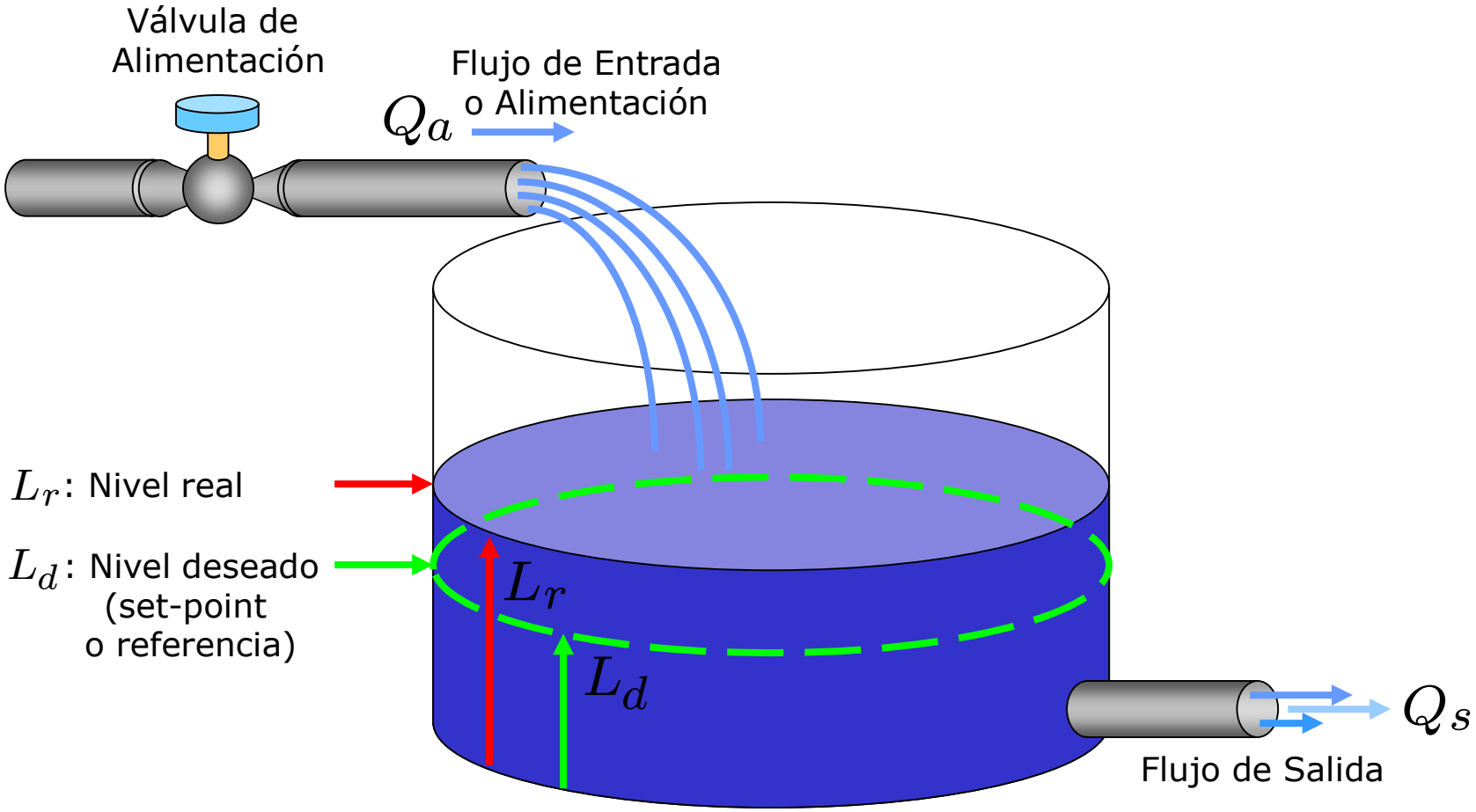


Control de Glucosa en Diabéticos





Control de Nivel (1/2)



➔ Objetivo de Control: Mantener el nivel $L_r(t) \approx L_d(t)$, –la mayor parte del tiempo que sea posible–, regulando el suministro de líquido mediante la válvula que ajusta el flujo Q_a.

Control de Nivel (2/2)

➔ La apertura de la válvula puede realizarse manualmente o a través de un *actuador*, por ejemplo, un servomotor eléctrico o un pistón neumático.

➔ Problema común de *control de inventario* en procesos químicos.

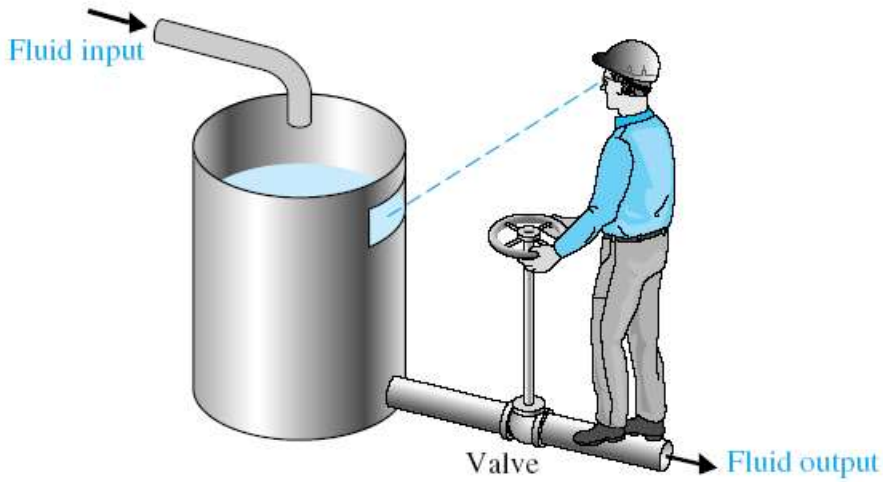
¿Qué modos de control existen?...

¿Cuál es el lazo de control?...

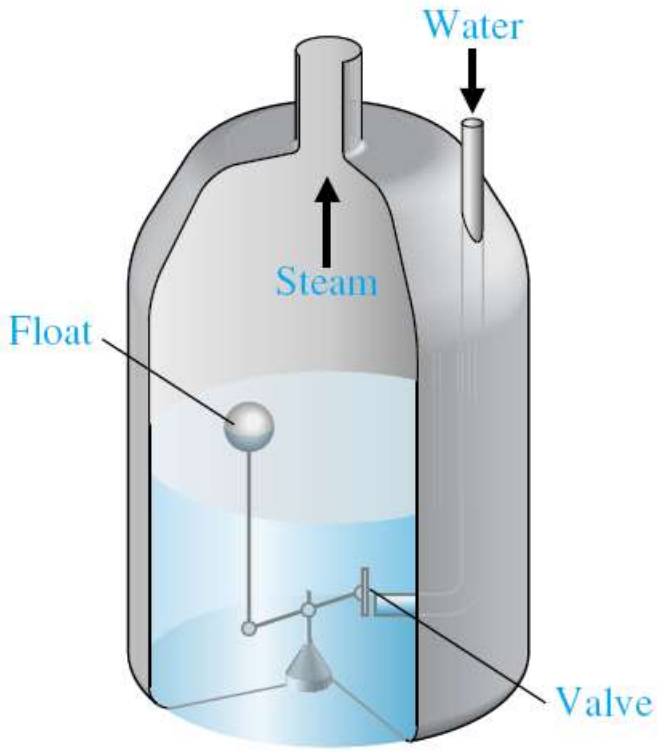
¿Cómo se representa formalmente?...

Modos de Control

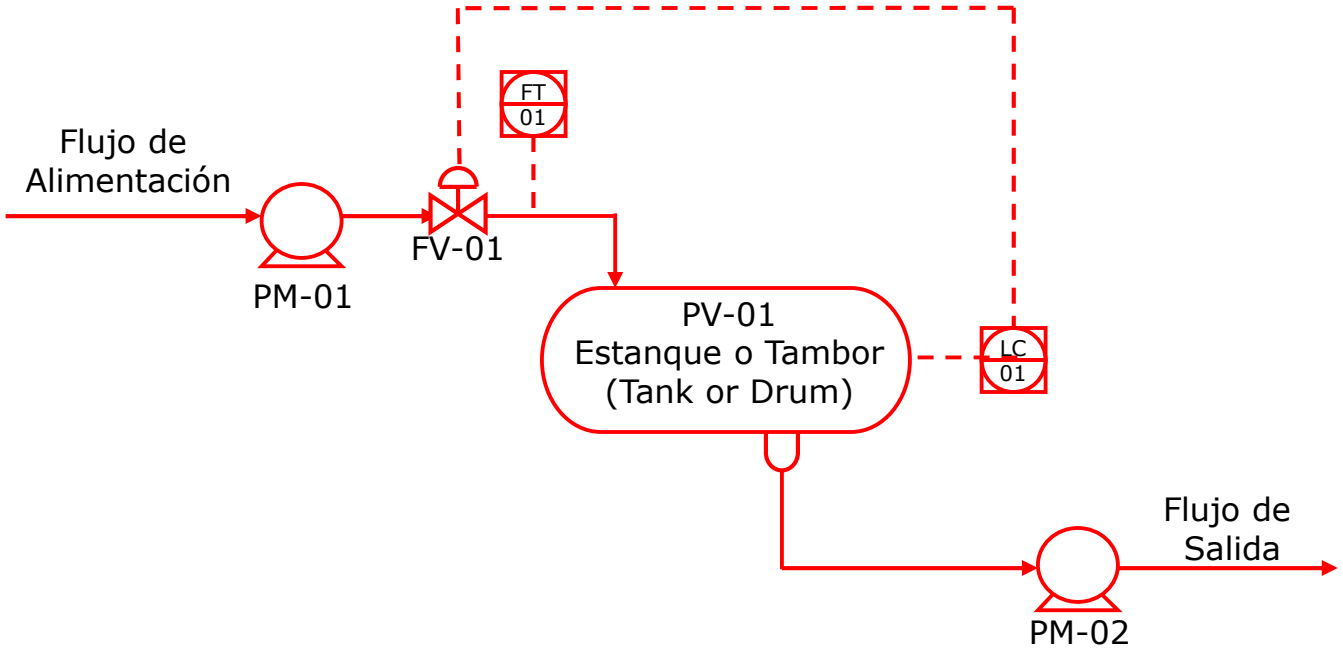
Control Manual



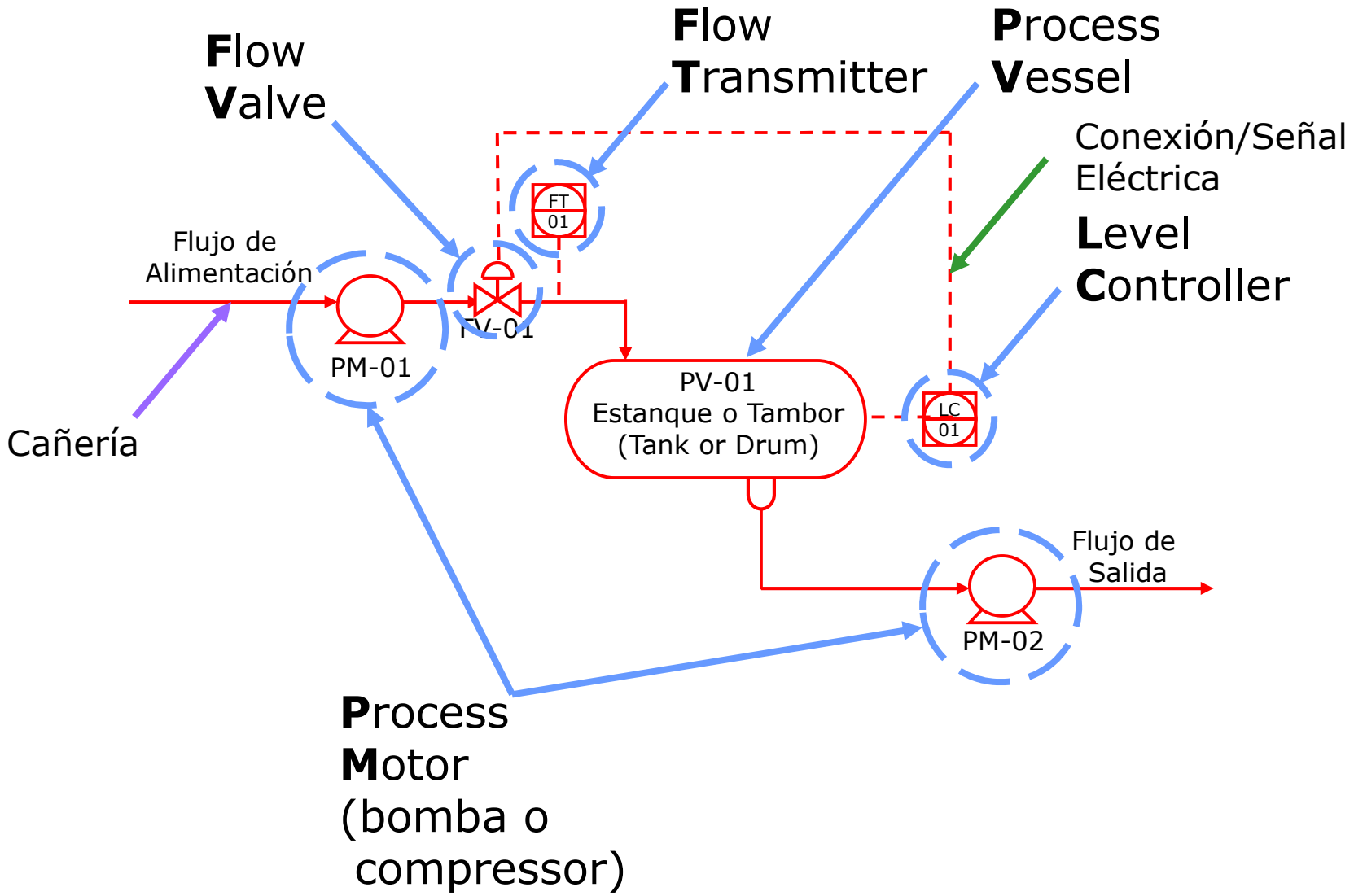
Control Automático



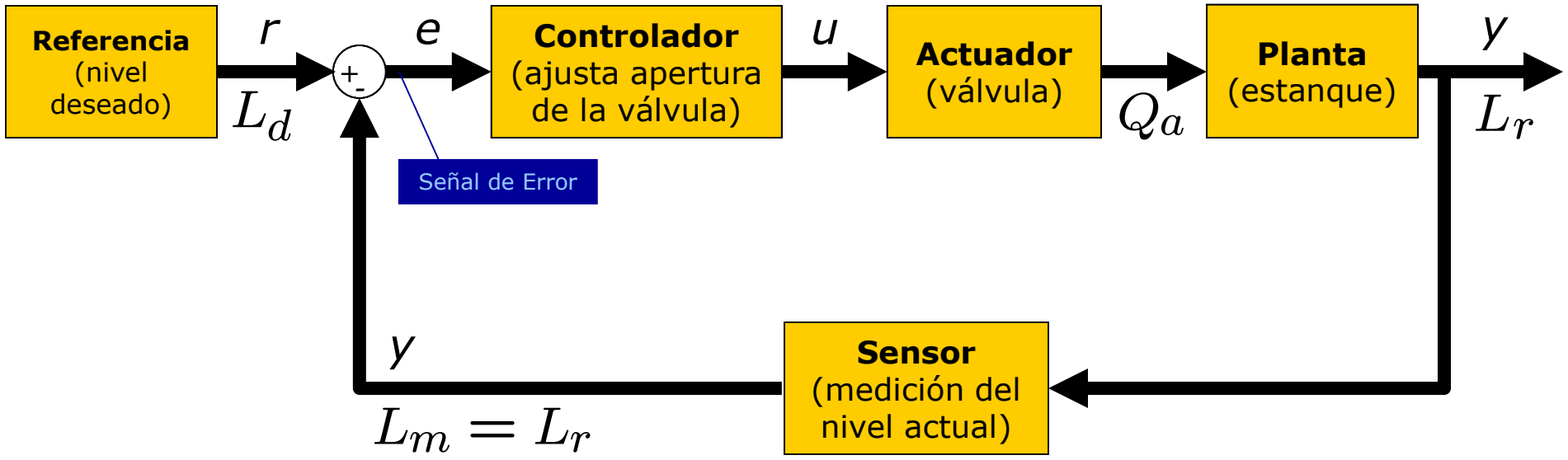
Diagramas P&ID: Piping and Instrumentation Diagrams



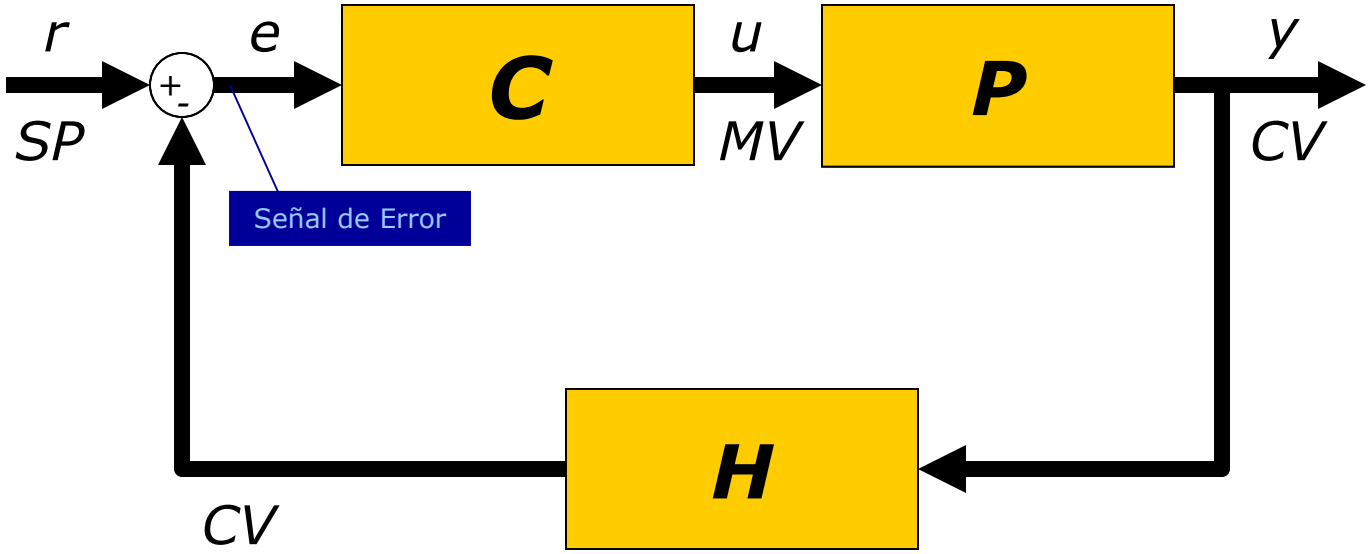
Simbología y Nomenclatura en los P&IDs



Lazo de Control de Nivel

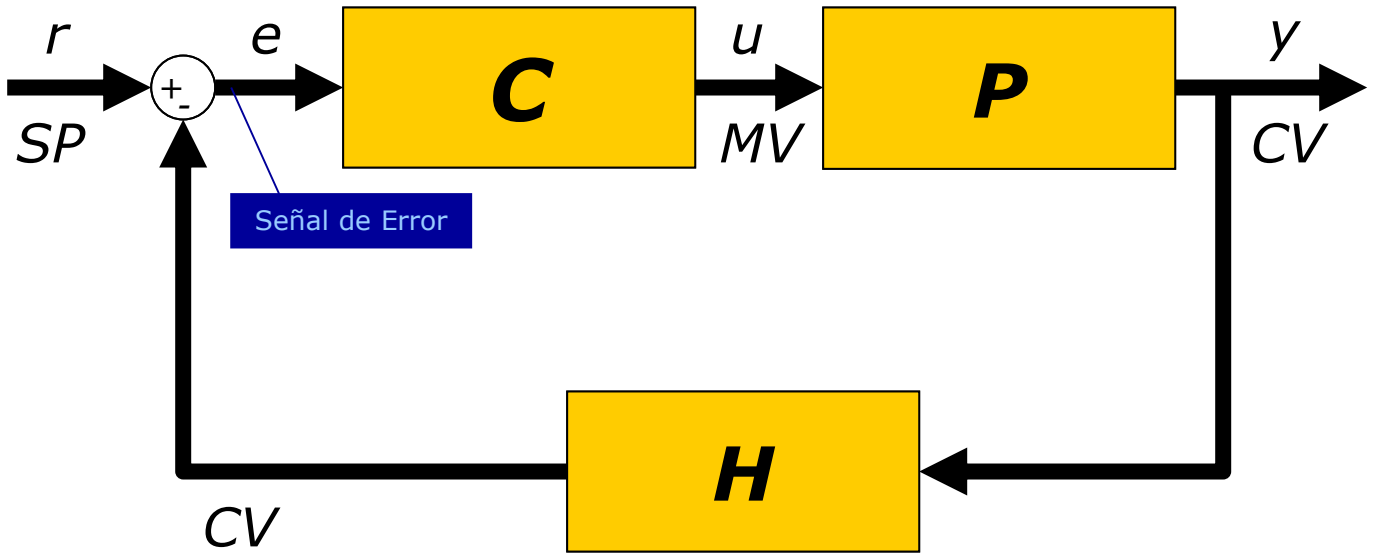


Lazo de Control Genérico

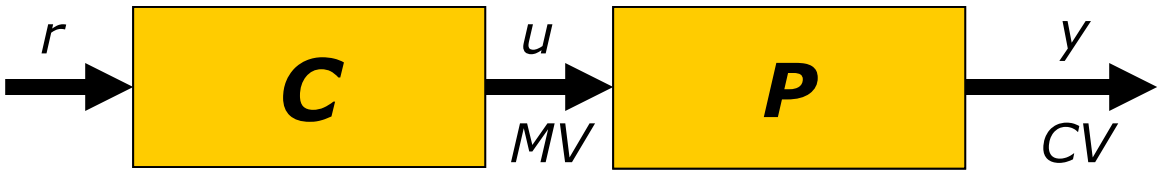


Tipos de Lazo de Control

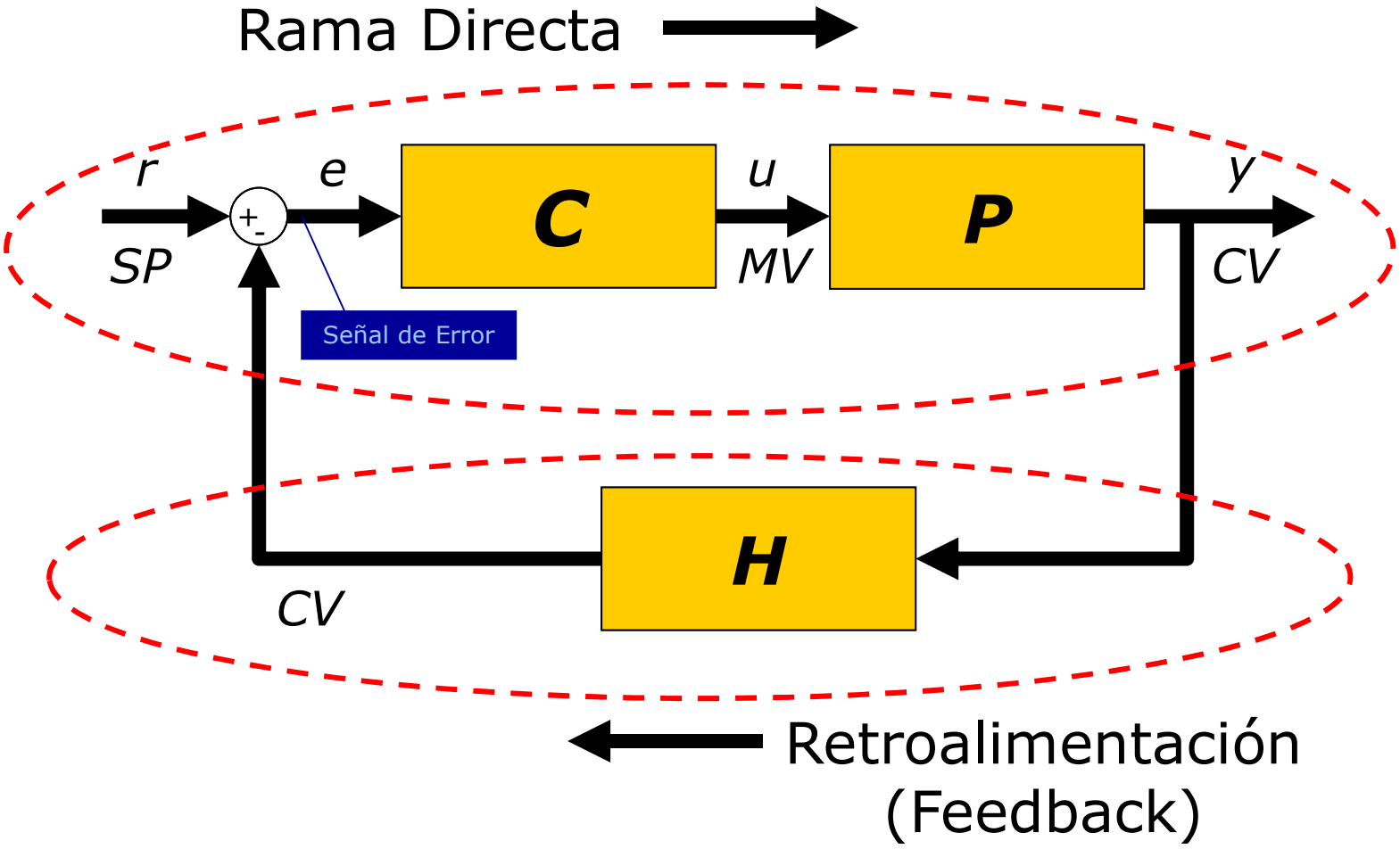
Control en Lazo Cerrado ("Modo Automático")



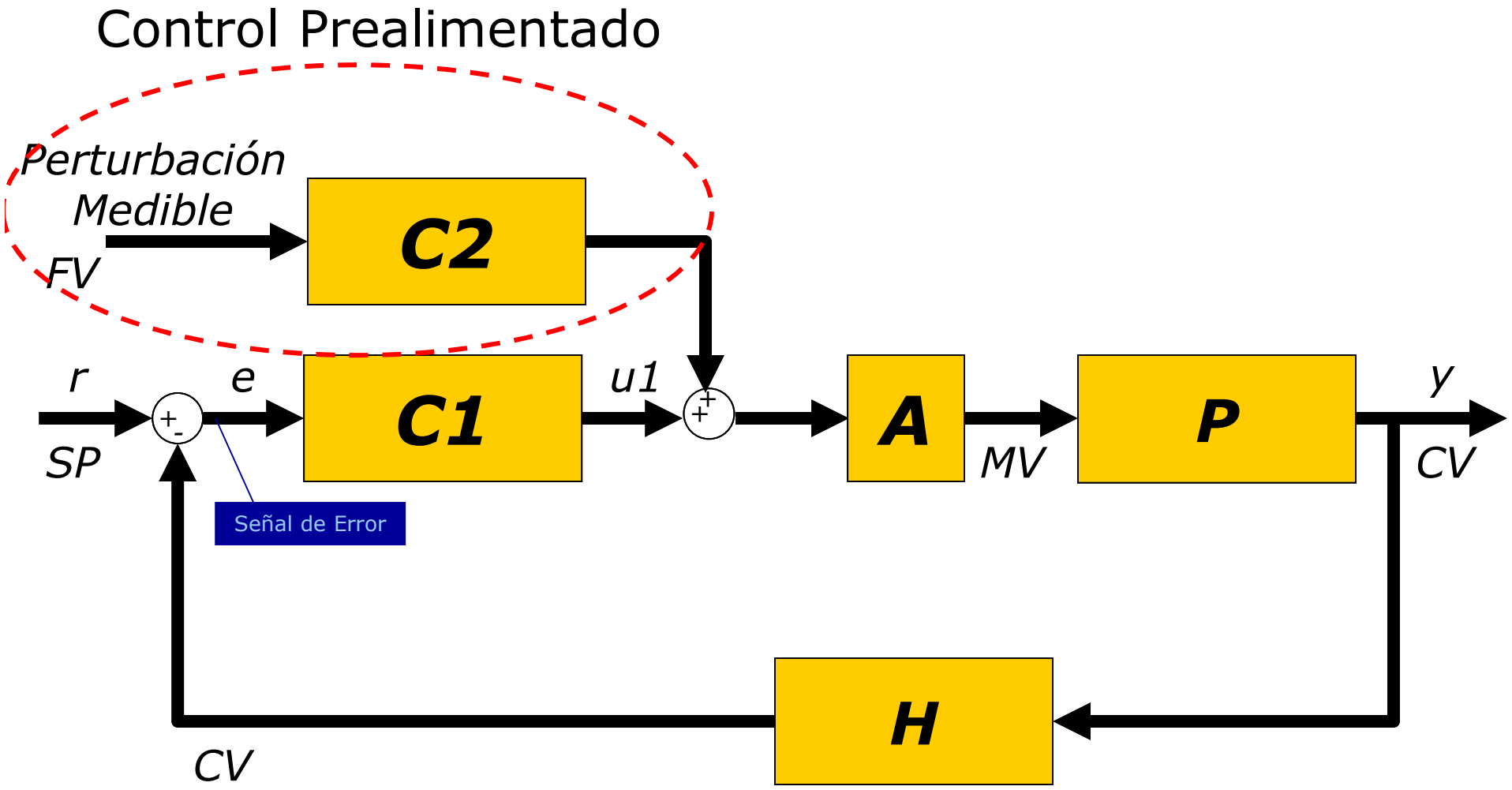
Control en Lazo Abierto ("Modo Manual"... sin supervisión)



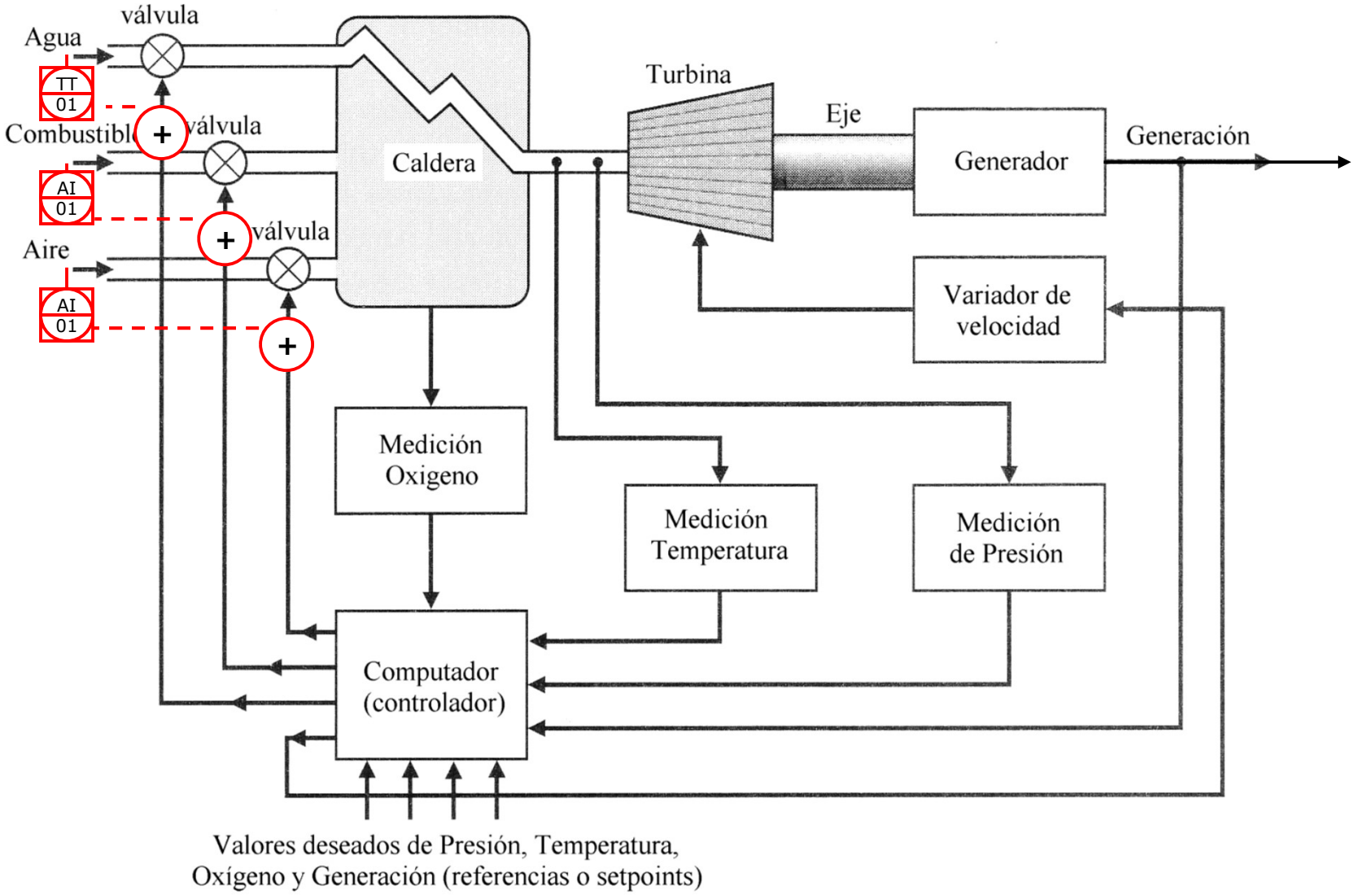
Ramas del Lazo de Control



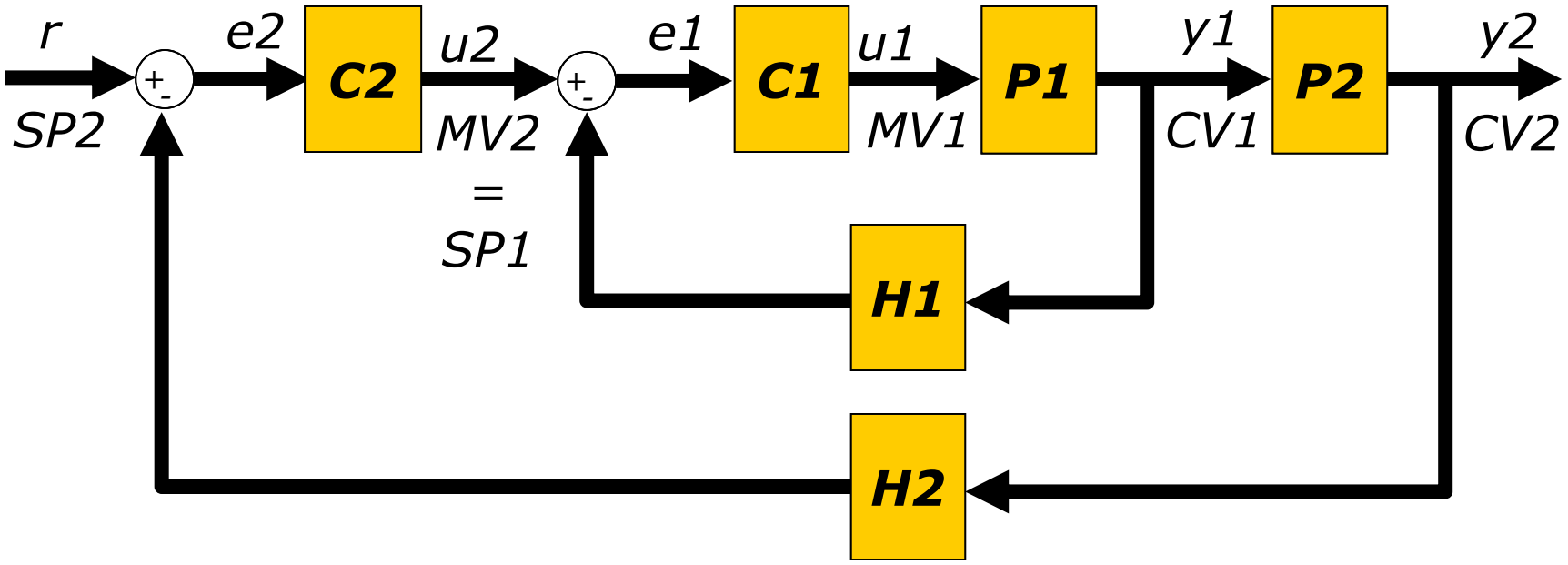
Control Pre-alimentado (Feedfoward)



¿Cuál sería el Control Prealimentado?



Control en Cascada



Terminología Básica – **CVs, SPs, MVs**

- Variables Controladas (**CV**s): Estas son las salidas del proceso (las *variables medidas*) que son reguladas (controladas) por el controlador (las CVs son entradas del controlador)
- Set-points (**SPs**): Son los valores de referencia deseados para cada una de las CVs, que el operador fija en el controlador (los SPs son entradas del controlador).
- Variables Manipuladas (**MV**s): Estas son las entradas del proceso (las *señales de comando* o *actuación*) que son ajustadas (manipuladas) por el controlador (las MVs son salidas del controlador, también referidas como **OP**s, abreviación de "output").

Esta es la nomenclatura que habitualmente se emplea en los sistemas industriales de control de procesos.

Terminología Básica – **DVs (FVs)**

- Perturbaciones (**DV**s, Disturbance Variables):
  Estos son las entradas del proceso que **no** pueden ser manipuladas, pero que son consideradas como influyentes en las variaciones de las CVs.
- Variables Pre-alimentadas o Feedforwards (**FV**s):
  Son variables que son sumadas directamente a la salida del controlador. En las estrategias de control con pre-alimentacíón, normalmente las DVs son utilizadas para compensar el valor de las MVs, y así llevar las CVs a sus SPs de manera más efectiva, anticipando los cambios que las mismas FVs inducen en las CVs.
- Variables del Proceso (**PV**s):
  Este término se refiere a las CVs, pero se evitará su uso, ya que una MV también es una "variable del proceso"!

Variables del Lazo de Control: Caso Control de Nivel

L_d: Nivel deseado es la *variable de referencia*.

L_r: Nivel real es la variable que se busca controlar (*variable controlada*).

Q_a: Flujo de alimentación o apertura de la válvula actuadora es la variable que se manipula para lograr que el nivel L_r sea en lo posible igual a L_d (*variable manipulada*).

➔ Considerando el estánque como una planta o sistema, es posible afirmar que:

L_d: Nivel deseado es el *input o entrada de referencia al controlador*.

L_r: Nivel real es el *output o salida de la planta* (no confundir con el flujo de salida, este no se busca controlar).

Q_a: Flujo de alimentación es el *input o entrada a la planta*.

Sistemas SISO y MIMO

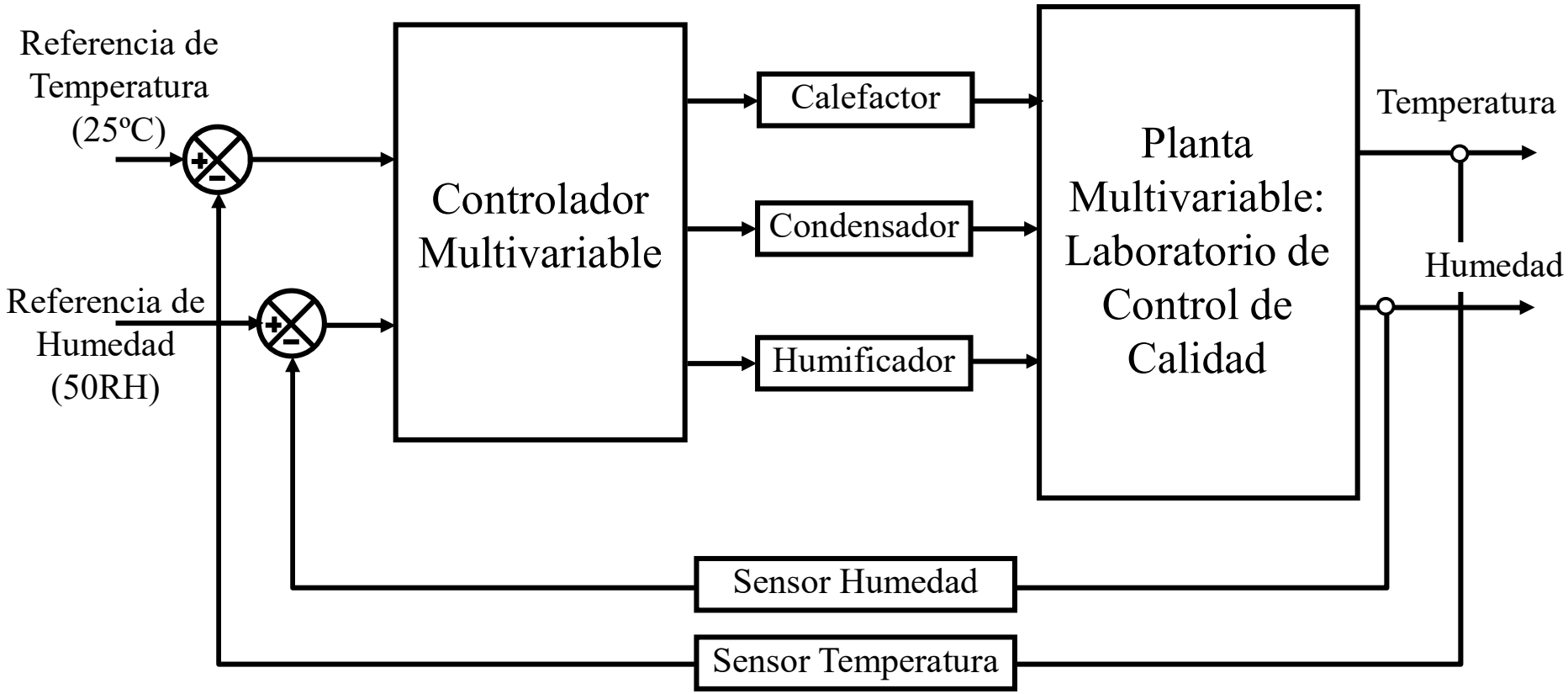
- **SISO**: Single-Input Single-Output
  Tienen una CV y una MV.
- **MIMO**: Multiple-Input Multiple-Output
  Tienen varias CVs y varias MVs.

Ejemplos...

Sistemas de Múltiples Entrada y Múltiples Salida (Multiple Input - Multiple Output, MIMO)

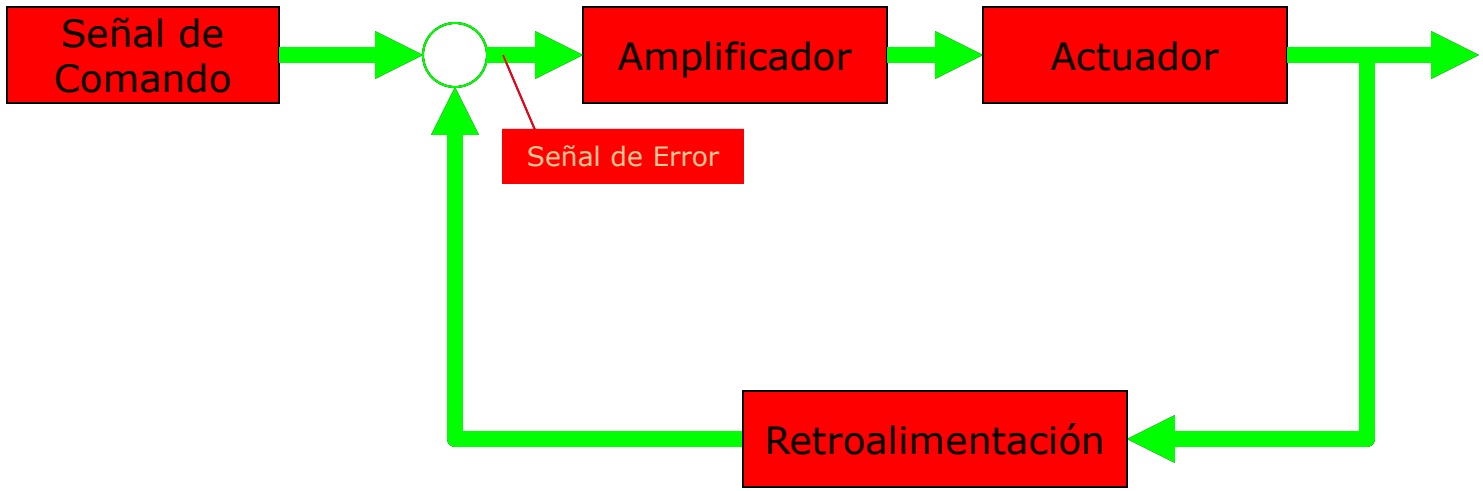
Son plantas y controladores que poseen más de una variable manipulada y más de una variable de salida o controlada.

Son configuraciones cuyo análisis y diseño de controladores requiere de conocimientos adicionales no incluidos en el presente curso.

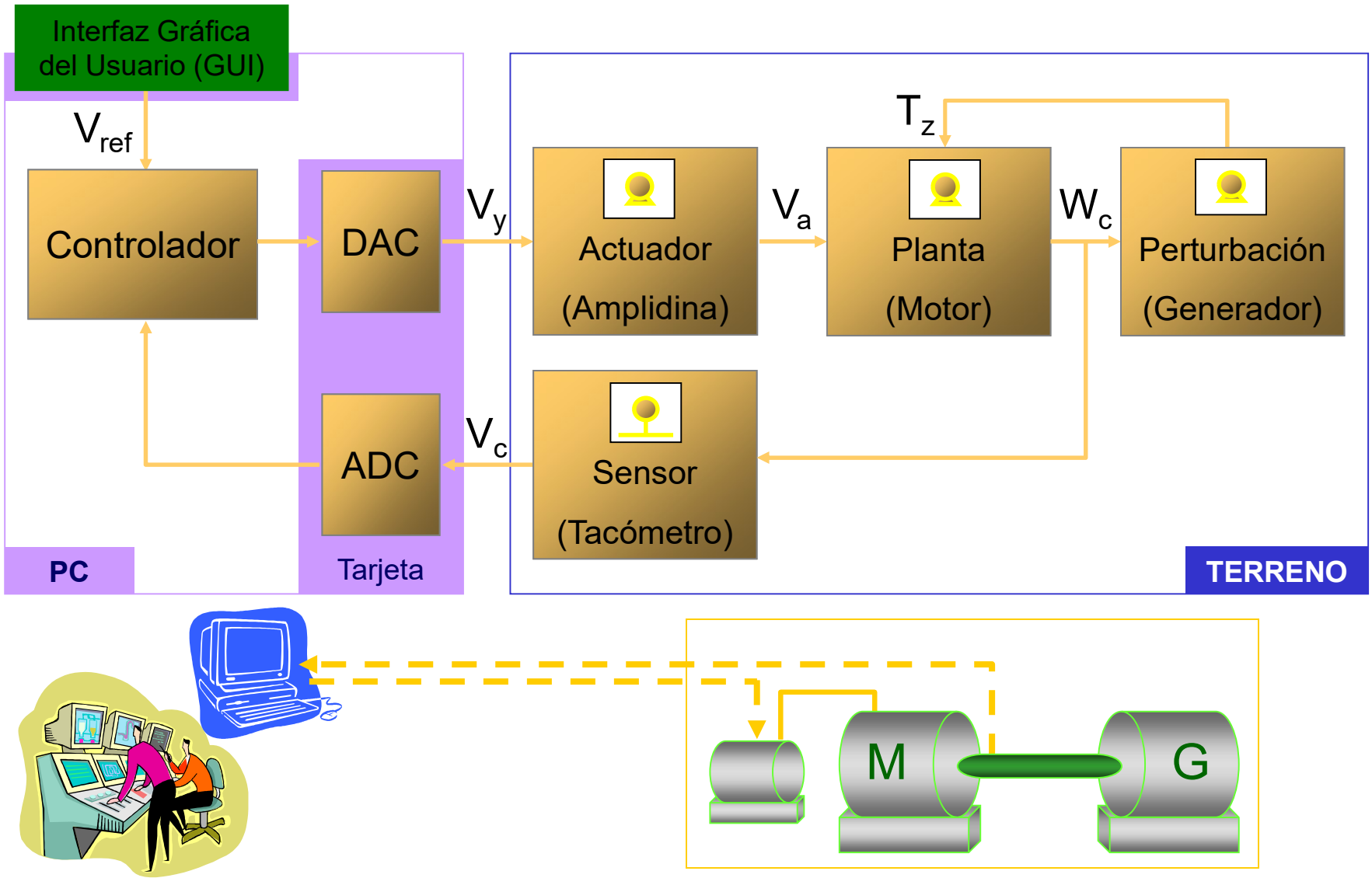


Esquema de Control Multivariable para Laboratorio de Control de Calidad
(Control Ambiental: Temperatura y Humedad)

Lazo de Control



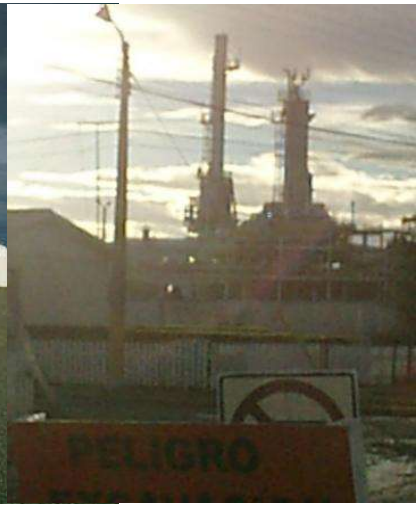
Lazo de Control



Procesos de Refinación



Planta Cabo Negro
ENAP Magallanes
Depropanizadora y Debutanizadora.
(*Foto: Miguel Torres, 2004*)

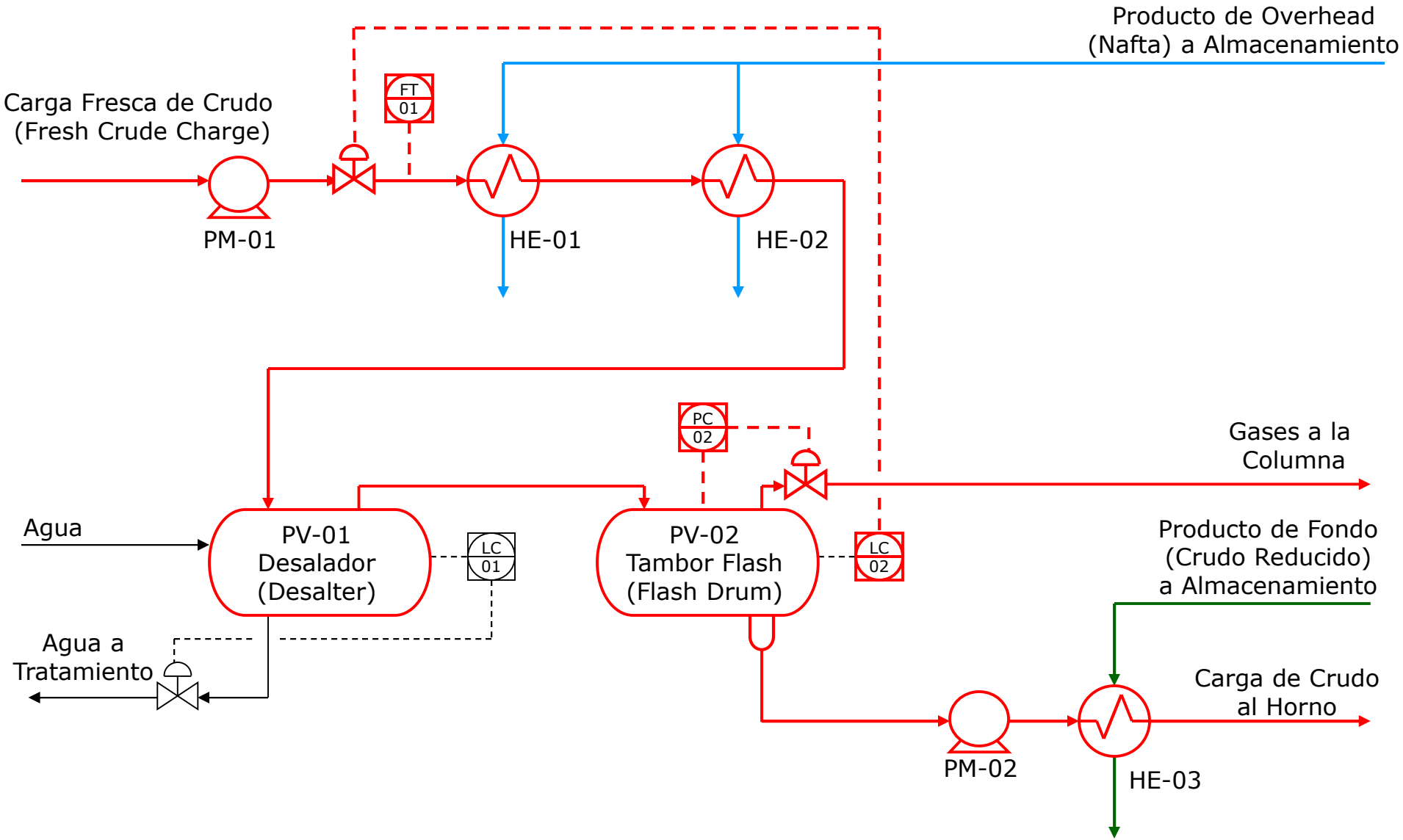


Refinería Gregorio
ENAP Magallanes
Columna Atmosférica.
(*Foto: Miguel Torres, 2004*)



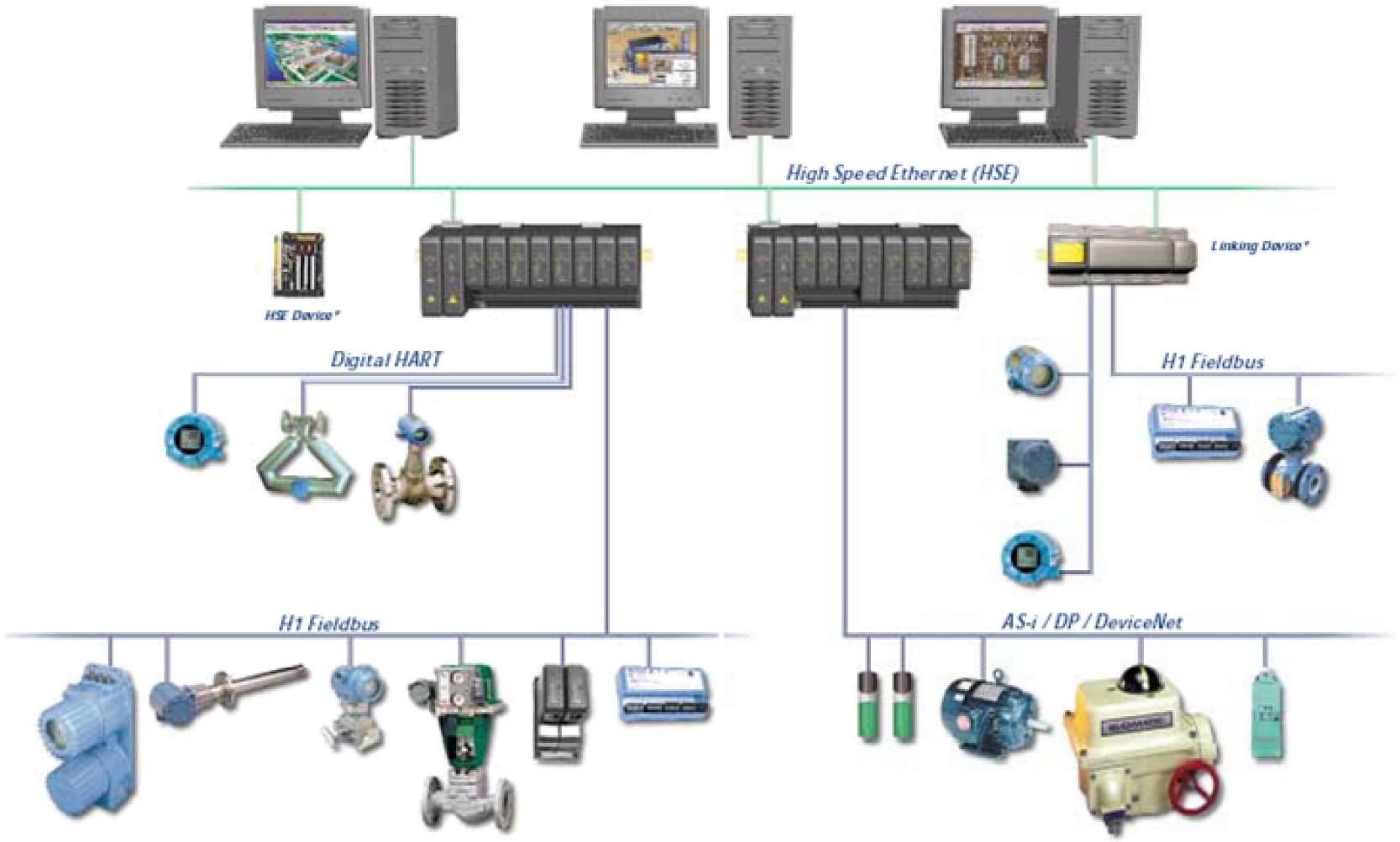
Refinería OMV Austria
(*Fuente: Control System Design, Graham C. Goodwin, Stefan F. Graebe, Mario E. Salgado, Prentice Hall, 2001*)

Control de Nivel



Componentes de un Sistema de Automatización

- Software
  - Algoritmos: Procesamiento de Señales, Filtros, Contol (PID, basados en modelos, etc.).
  - Comunicaciones: Protocolos, codificación, detección de errores, etc.
  - Interfaces de Usuario: Despliegue en consolas.
  - Sistemas Operativos de Tiempo Real.
  - Programas de Análisis y Registro: Historiadores y recolectores de mediciones, BIT (Built-In-Test), tolerancia a fallas.
- Hardware
  - Sensores: Temperatura, humedad, velocidad, etc.
  - Actuadores: motores, válvulas, pistones, etc.
  - Comunicaciones (Capa física): Transductores, conversores, fibra óptica, RF, etc.
  - Controladores: Procesadores dedicados, computadores, PLC's.
  - BITE (Built-In-Test-Equipment)
  - Interfaces: Consolas (teclados, pantallas, etc.) adaptadores de señal, etc.


High Speed Ethernet (HSE)
HSE Device*
Linking Device*
Digital HART
H1 Fieldbus
H1 Fieldbus
AS-i / DP / DeviceNet

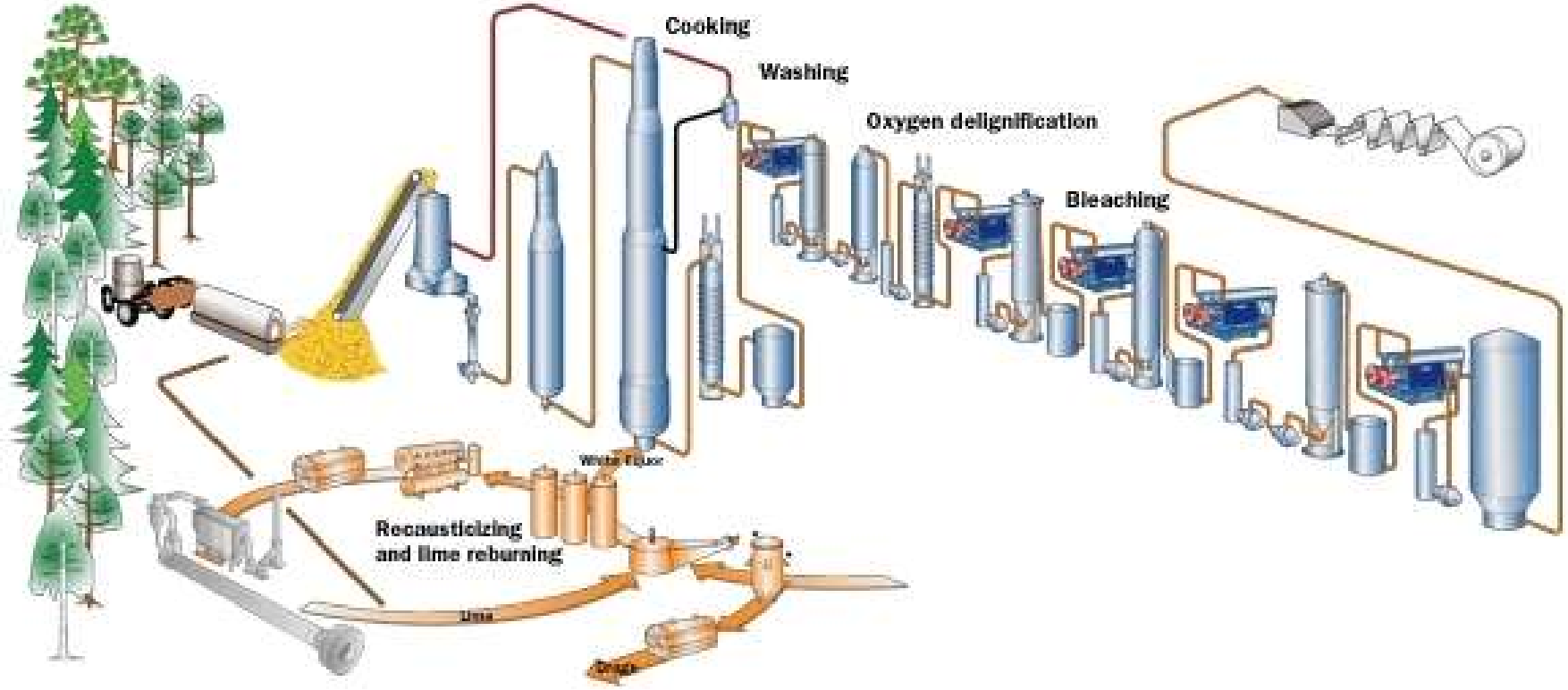
Motivación

El control automático permite:

- Mejorar la calidad de los productos.
- Minimizar desperdicios.
- Reducir gastos de energía.
- Aumentar la capacidad de procesamiento (throughput) para una capacidad instalada nominal.
- Mejorar el rendimiento y la producción.
- Retardar renovaciones/actualizaciones de la planta.
- Aumentar los márgenes de seguridad.
- Proteger a los usuarios y al medio ambiente.

Beneficio Económico: Mayor producción, menores insumos.

Proceso kraft de Carl Dahl (1879)
para transformación de pulpa en papel
Fuente: http://en.wikipedia.org/wiki/Kraft_process



Calidad del Producto: En muchos procesos, el tema de la calidad es relevante y no está asociado necesariamente a un problema de producción.

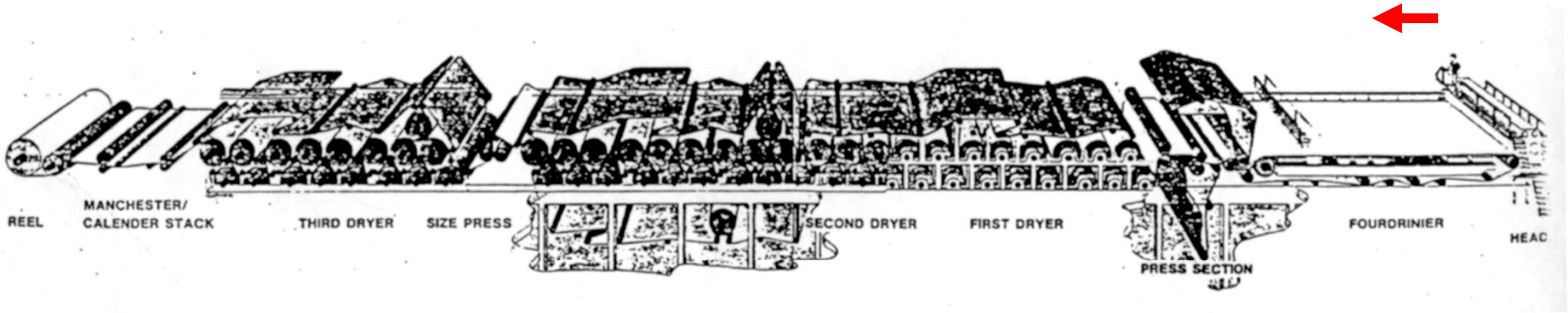
Beneficio Económico: Mayor producción, menores insumos.

Proceso de fabricación de papel
basado en la máquina de Fourdrinier (1806)
Fuente: http://en.wikipedia.org/wiki/Papermachine

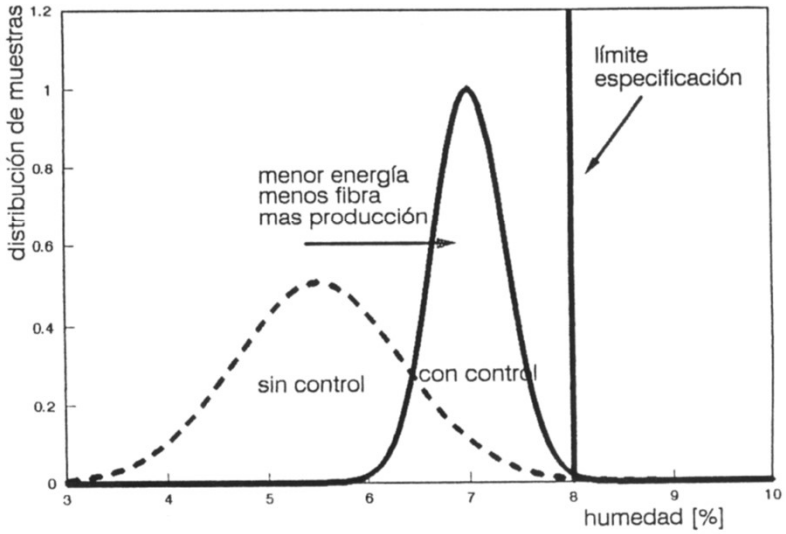


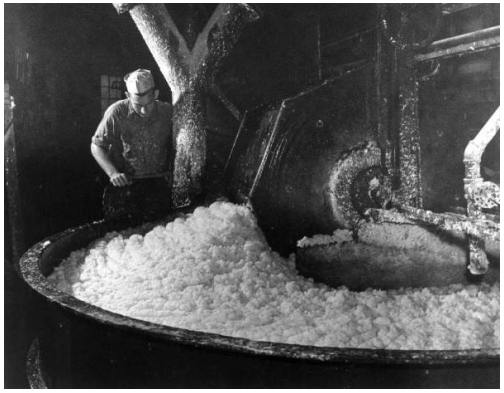
Calidad del Producto: En muchos procesos, el tema de la calidad es relevante y no está asociado necesariamente a un problema de producción.

Beneficio Económico: Mayor producción, menores insumos.









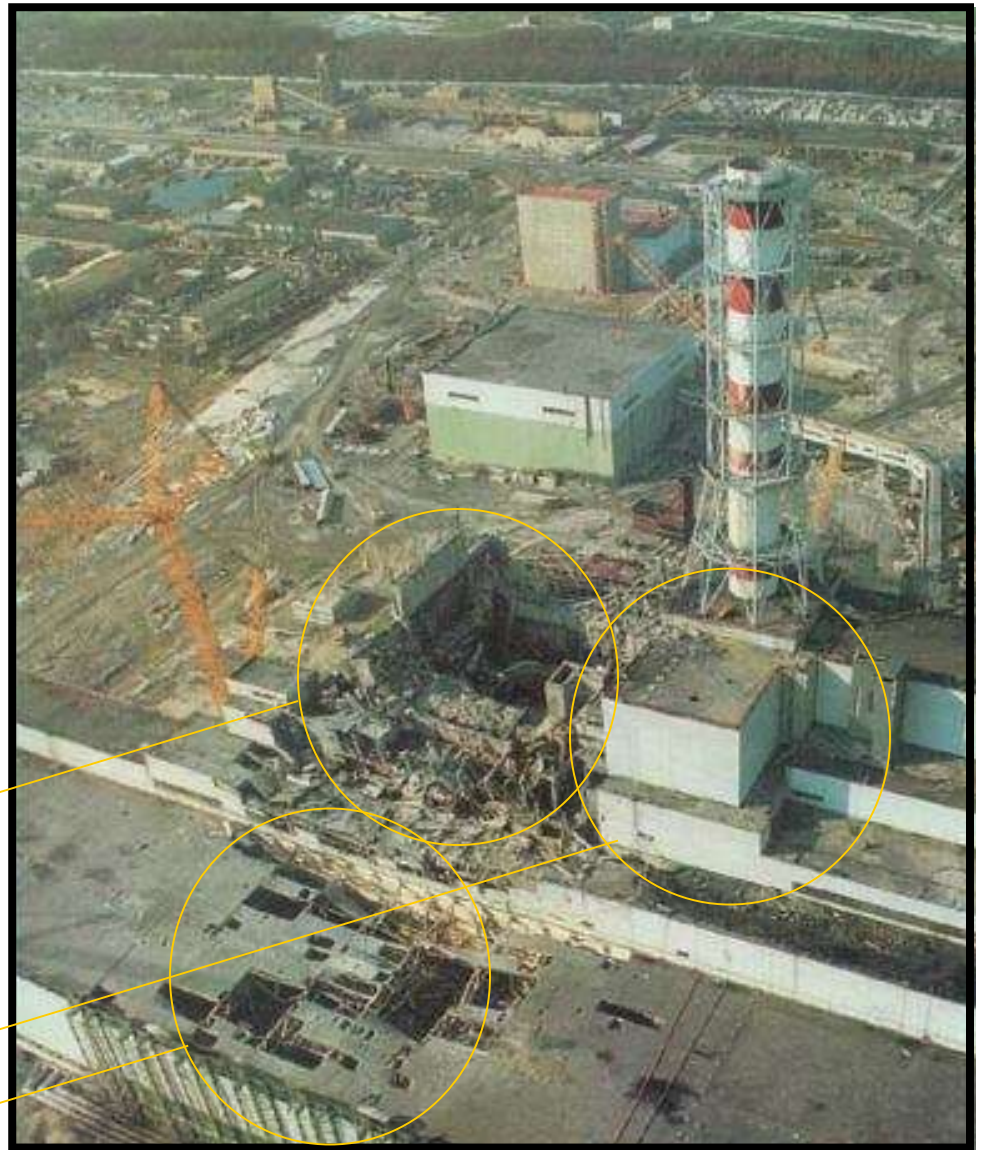
Calidad del Producto: En muchos procesos, el tema de la calidad es relevante y no está asociado necesariamente a un problema de producción.

Seguridad Personal y Protección del Ambiente

El contar con instrumentación y mecanismos de actuación, es fundamental para prevenir accidentes sobre operadores o sobre el entorno.

Aspectos de estabilización de procesos son claves en este sentido y una automatización debe considerar esto, especialmente en procesos exotérmicos o de reactores nucleares, donde una medición pueda activar acciones de desactivación de etapas dentro de la planta.





Desastre de Chernobyl
26 abril 1986

Eficacia

La eficacia no guarda relación con la eficiencia; de hecho muchas veces son contrapuestas. Un par de ejemplos son aplicaciones aeroespaciales o de defensa, donde el costo es secundario frente al cumplimiento del objetivo por parte del sistema de automatización (llegar a Marte, derribar avión enemigo, etc.)



Otros Objetivos: Sistemas Autónomos de Exploración





Robot Zoë (CMU) durante la pruebas del sensor de fluorescencia para la detección de microorganismos en el desierto de Atacama.

Otros objetivos: Sistemas de Entrenamiento



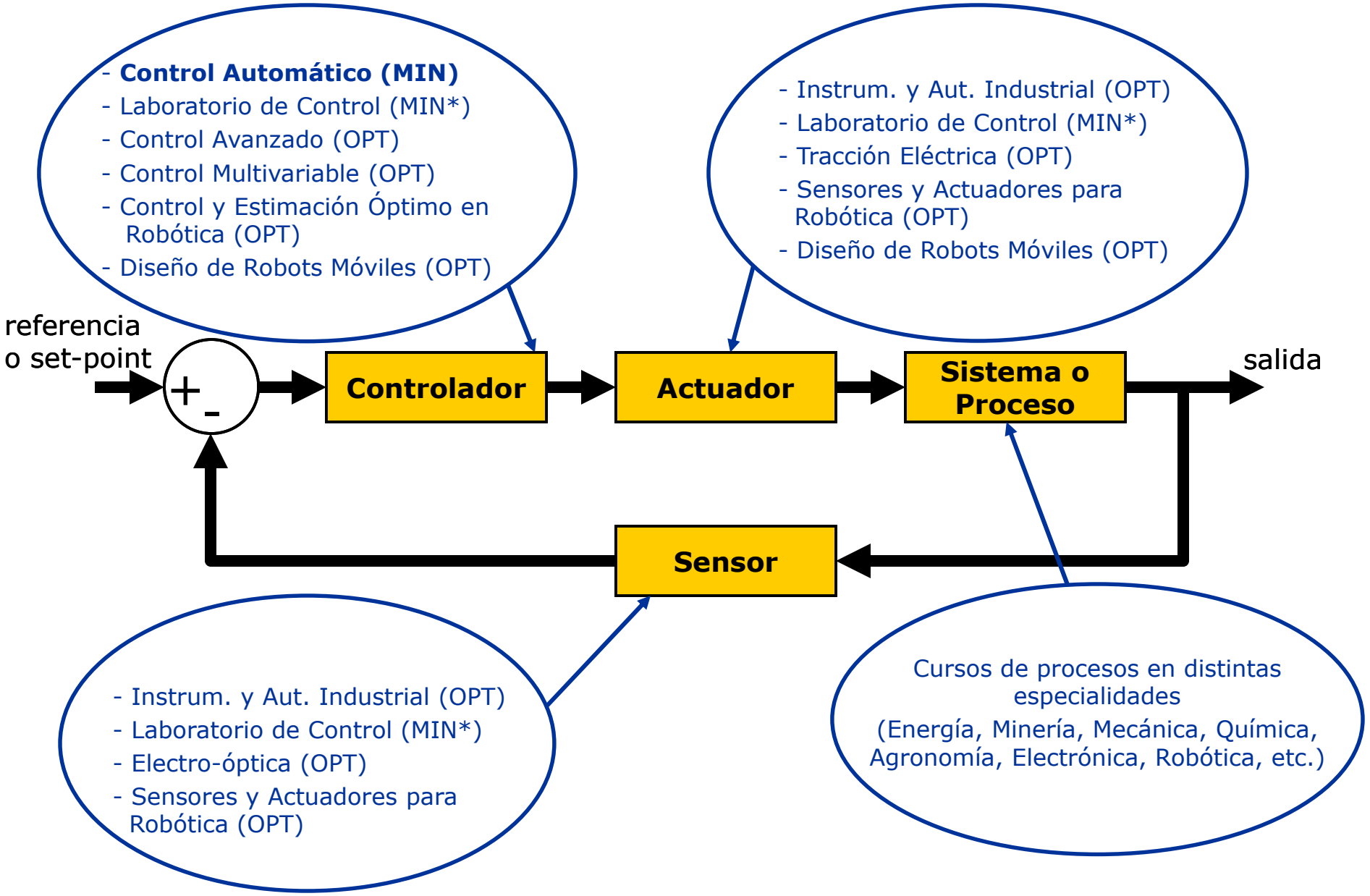
Boeing 777-200 Cockpit

Instrumentación y Controles



Boeing P-8 / Boeing 737-MMA (Multimission Maritime Aircraft) Cockpit and Instrumentation Panel
(http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Boeing_737-MMA_Cockpit.jpg
http://en.wikipedia.org/wiki/Glass_cockpit
http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Boeing_737-MMA_Cockpit.jpg)
Ver también http://a340gc.iradis.org/about/ Airbus 340 Glass Cockpit Project (Open Source Lib.)

Cursos de Area de Atuomatización



Herramientas para el Diseño de Sistemas de Control (1)

- Conceptos Básicos:
  - Lazo de Control
  - Modelación y Linealización
  - Estabilidad
  - Controlabilidad y Observabilidad
- Técnicas Clásicas (Dominio de la Frecuencia):
  - Diagrama de Polos y Ceros
  - Lugar Geométrico de las Raíces
  - Criterio de Routh-Hurwitz
  - Diagrama de Nyquist: $\mathrm{Im}\{F(j\omega)\}$ vs. $\mathrm{Re}\{F(j\omega)\}$ (polar)
  - Diagrama de Nichols: $\|F(j\omega)\|$ vs. $\angle F(j\omega)$
  - Diagrama de Bode: $\{\|F(j\omega)\|$ vs. $\omega,\ \angle F(j\omega)$ vs. $\omega\}$
  - Control PID & Compensadores de Avance y Retardo

Herramientas para el Diseño de Sistemas de Control (2)

- Técnicas Modernas (Espacio de Estados):
  - Representación en el Estado
  - Retroalimentación del Estado para Re-localización de las Raíces
  - Observadores
- Discretización y Control Digital

Herramientas para el Diseño de Sistemas de Control (3)

- Técnicas Avanzadas*:
  - Control Optimo: LQR (Linear Quadratic Regulators)
  - Observadores y Filtro Optimos: Filtro de Kalman
  - Programación de Ganancias (Gain-scheduling)
  - Técnicas de Lyapunov y análisis en el dominio del tiempo.
  - Control Multivariable: MPC, H^{∞}.
  - Control de Lógica Difusa
  - Redes Neuronales

** Interesados pueden tomar los cursos de especialización en el área de Automátización y Robótica. Dada su importancia en una serie de aplicaciones, procuraremos estudiar las técnicas LQR, los filtros de Kalman y la Programación de Ganancias en este curso*.

Preguntas QQ Quick Quizz

- ¿Cuál es el objetivo de un controlador?
- ¿Cuál es el objetivo de control del sistema que se muestra en la figura?
- ¿Cuáles son las variables controladas de la economía del país? ¿Cuáles son las variables manipuladas? ¿Cuáles son las perturbaciones perturbaciones?
- ¿El control pre-alimentado forma parte de la rama de alimentación directa, V o F?

Definición del ***Problema de Control***

Definición 1.1:

El problema central en control es encontrar una manera técnicamente factible de actuar sobre un proceso dado, de manera que este se comporte de acuerdo a lo especificado en el mayor grado posible.

Además este comportamiento deseado debe lograrse en la presencia de incertidumbre del proceso y perturbaciones externas no controlables que afectan al proceso.

Clasificación Básica de los Sistemas de Control

1. **Sistemas de control o reguladores (control regulatorio):** El output controlado (CV) *es mantenido* tan cerca como sea posible a un set-point deseado comúnmente constante, *a pesar de las perturbaciones*.
   Ejemplos: Controles de nivel y temperatura en plantas químicas.
2. **Servomecanismos o sistemas de "trackeo" (tracking systems):** El output controlado (CV) *sigue* tan cerca como sea posible un comando variante en el tiempo, *a pesar de las perturbaciones*.
   Ejemplos: Brazos robóticos, control de posición de aeronáves, guiado de misiles, seguimiento de trayectorias y navegación de satélites.

Terminología y Ejemplos

	Ejemplos Tangibles	**Ejemplos de Aproximaciones Matemáticas**	**Ejemplos de Propiedades**
Señales	SP's, MV's, CV's, DV's, …	contínuas, discretas, procesos aleatorios, ...	analítica, periódica, estocástica, momentos, ...
Sistemas	actuadores, controladores, procesos, sensores	ecuaciones diferenciales, ecuaciones de diferencias, funciones de transferencia, modelos en el espacio de los estados,...	tiempo continuo, discreto, lineales, no-lineales...

Otros Ejemplos de Sistemas de Control

Sistema	**Variables Controladas**	**Controlador**	**Desempeño Deseado**
Automóviles	Velocidad	Control de velocidad crucero (cruise controller)	Alcanzar y mantener la velocidad deseada sin gastar combustible indebidamente
Aviones	Curso, inclinación, rotación, cabeceo	Piloto automático	Mantener una trayectoria segura y suave
Hornos	Temperatura	Control de temperatura	Seguir un perfil de calentamiento y luego mantener la temperatura
Tratamiento de Desperdicios	pH del efluente	Controlador de pH	Neutralizar el efluente a un grado especificado

Ejemplos de Perturbaciones e Incertidumbre

Sistema	Actuadores	Sensores	Perturbaciones	Incertidumbres
Automóviles	Posicionador del acelerador	Tacómetro	Variaciones en la pendiente del terreno	Masa, dinámica exácta
Aviones	Throttle (servo-reguldador de aceleración), timón de cola, flaps, etc.	Instrumentos de navegación	Viento, bolsas de aire, etc.	Masa, aerodinámica exacta, etc.
Hornos	Válvulas de los quemadores	Termocuplas y sensores de tempretura	Temperatura del flujo de alimentación, etc.	Termodinámica exácta, distribución de temperaturas
Tratamiento de Desperdicios	Servoválvula de regulación del ácido	Sensor de pH	Concretación del flujo de alimentación	Curva de ganancia del pH, errores de medición

Ejemplo: Refinería Gregorio – ENAP Magallanes



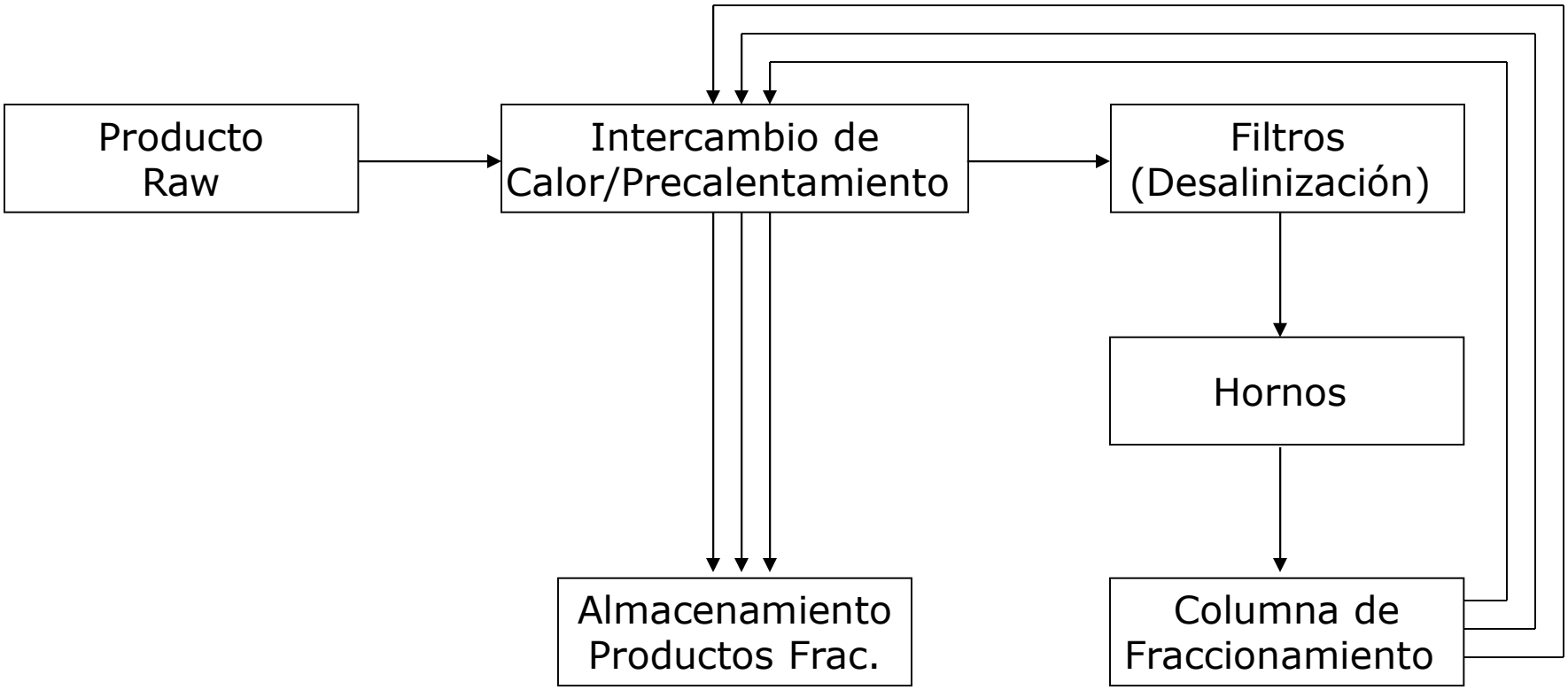
Ejemplo: Refinería Gregorio – ENAP Magallanes



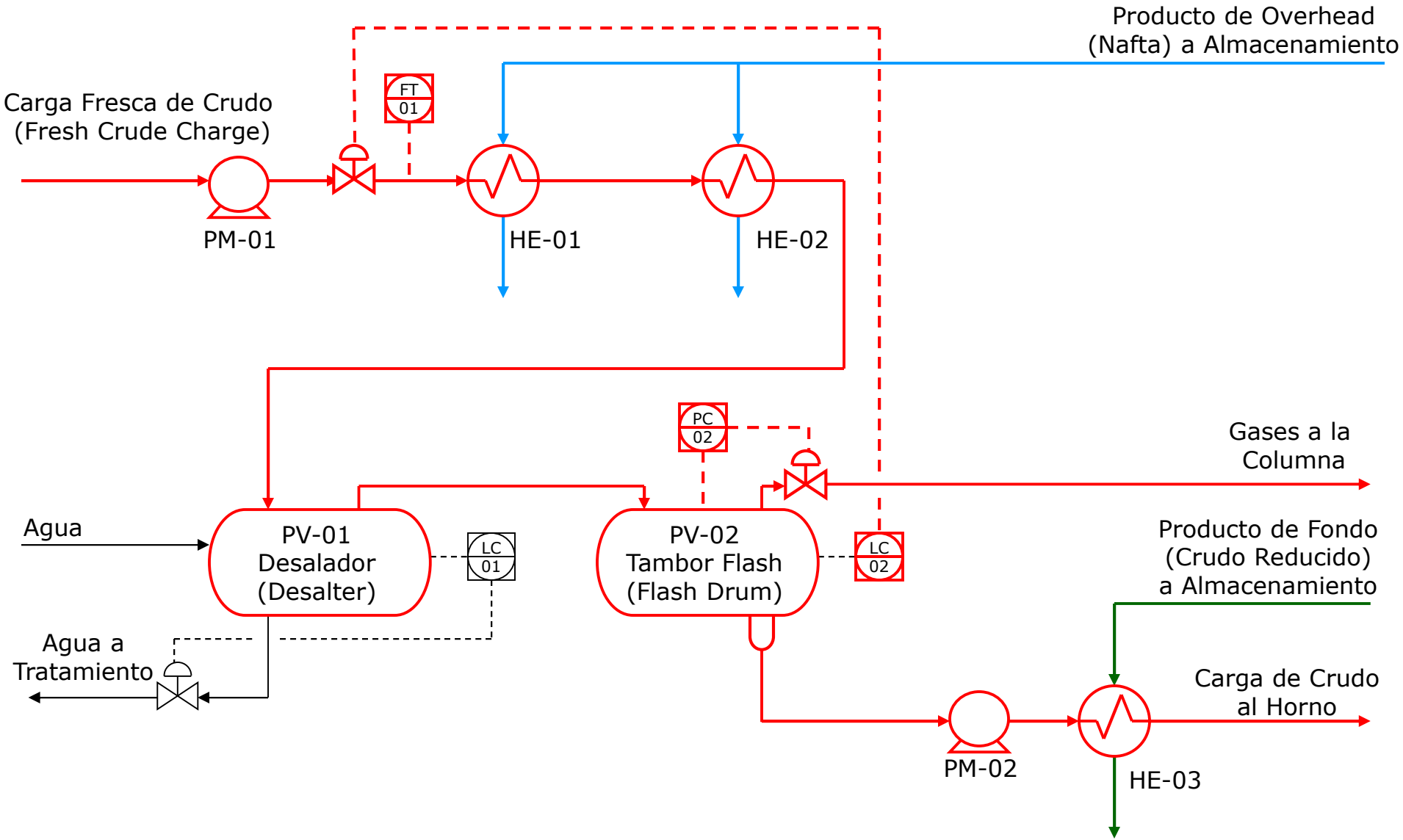
Ejemplo: Refinería Gregorio – ENAP Magallanes



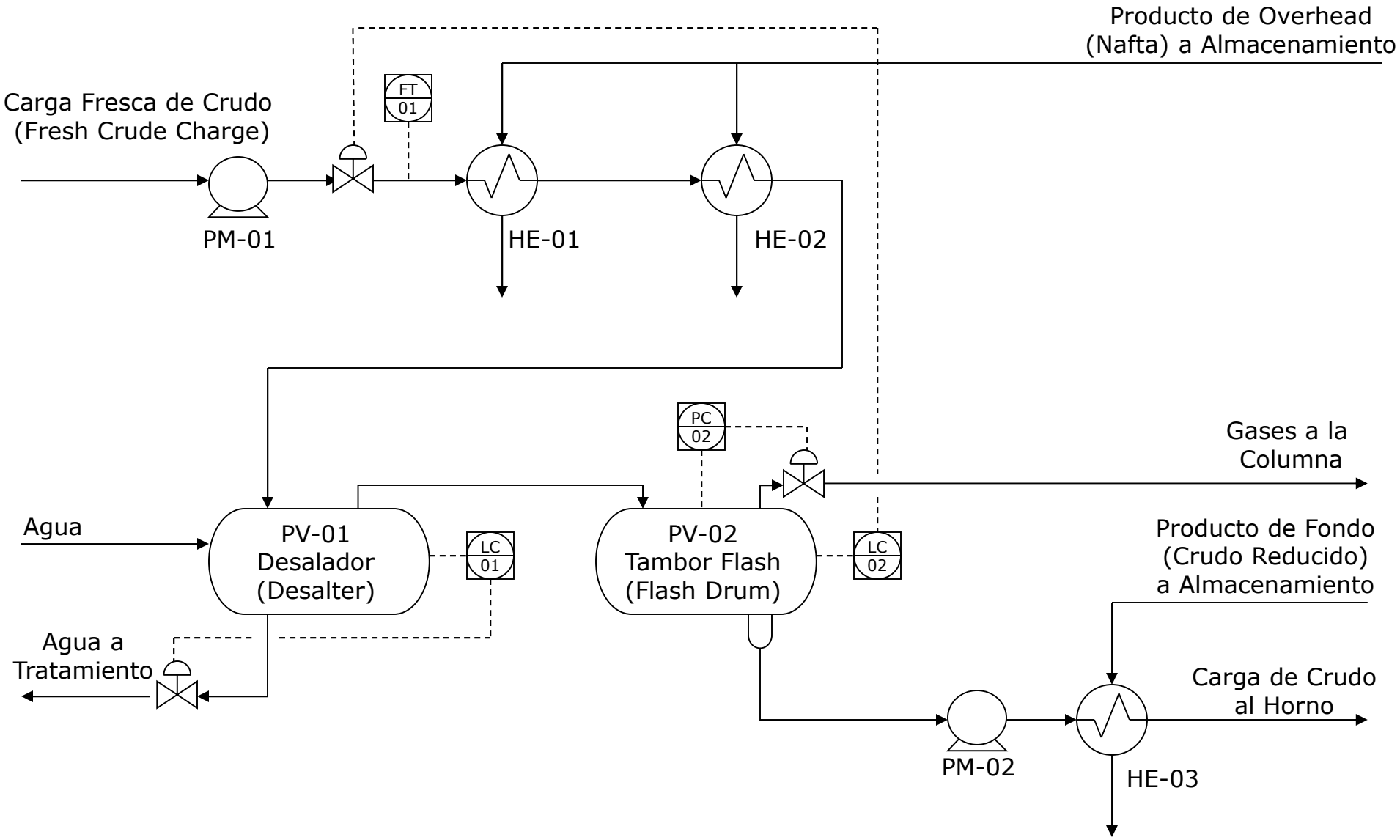
Diagrama General de Bloques – Proceso de Destilación



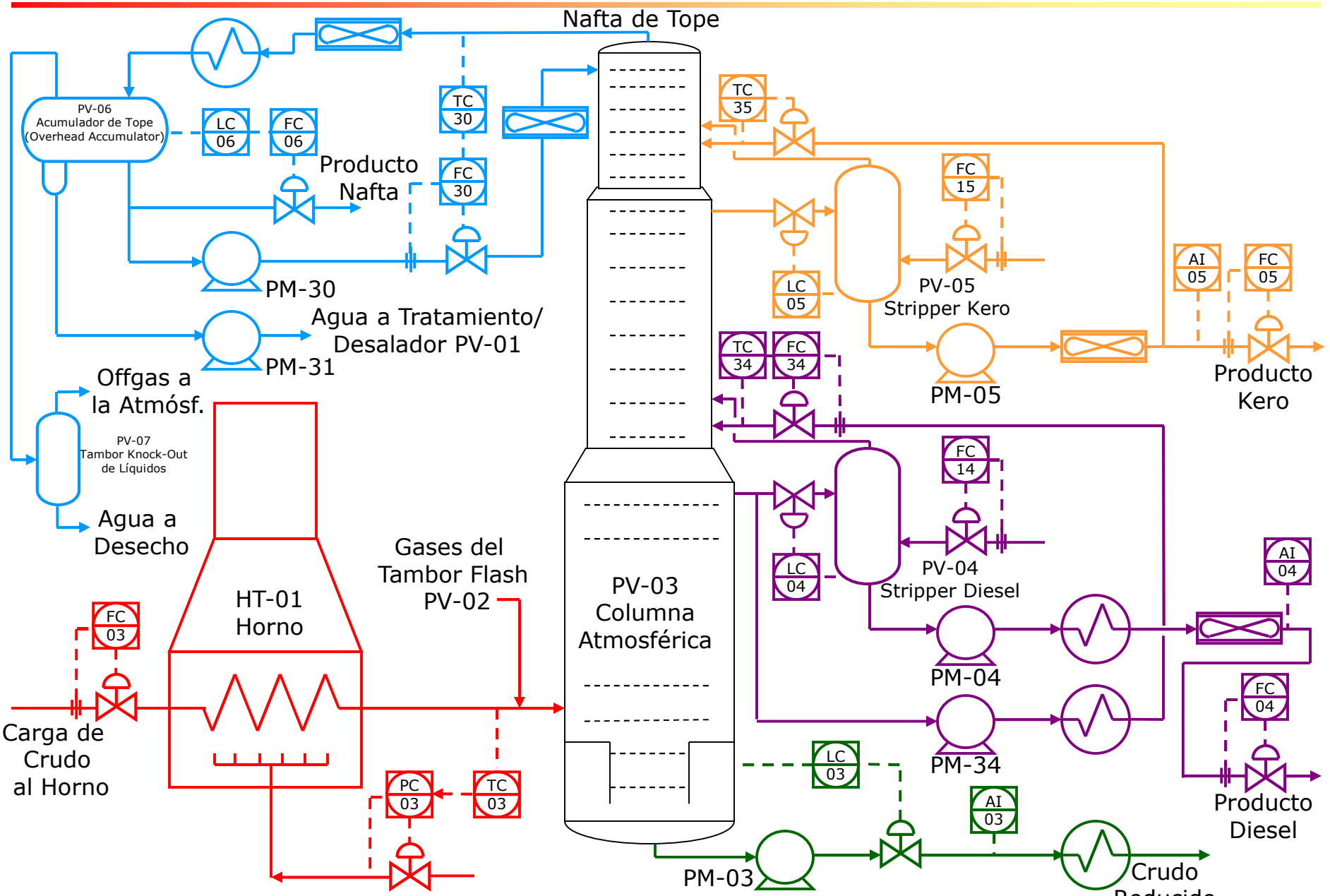
P&ID: Precalentamiento y Desalinización



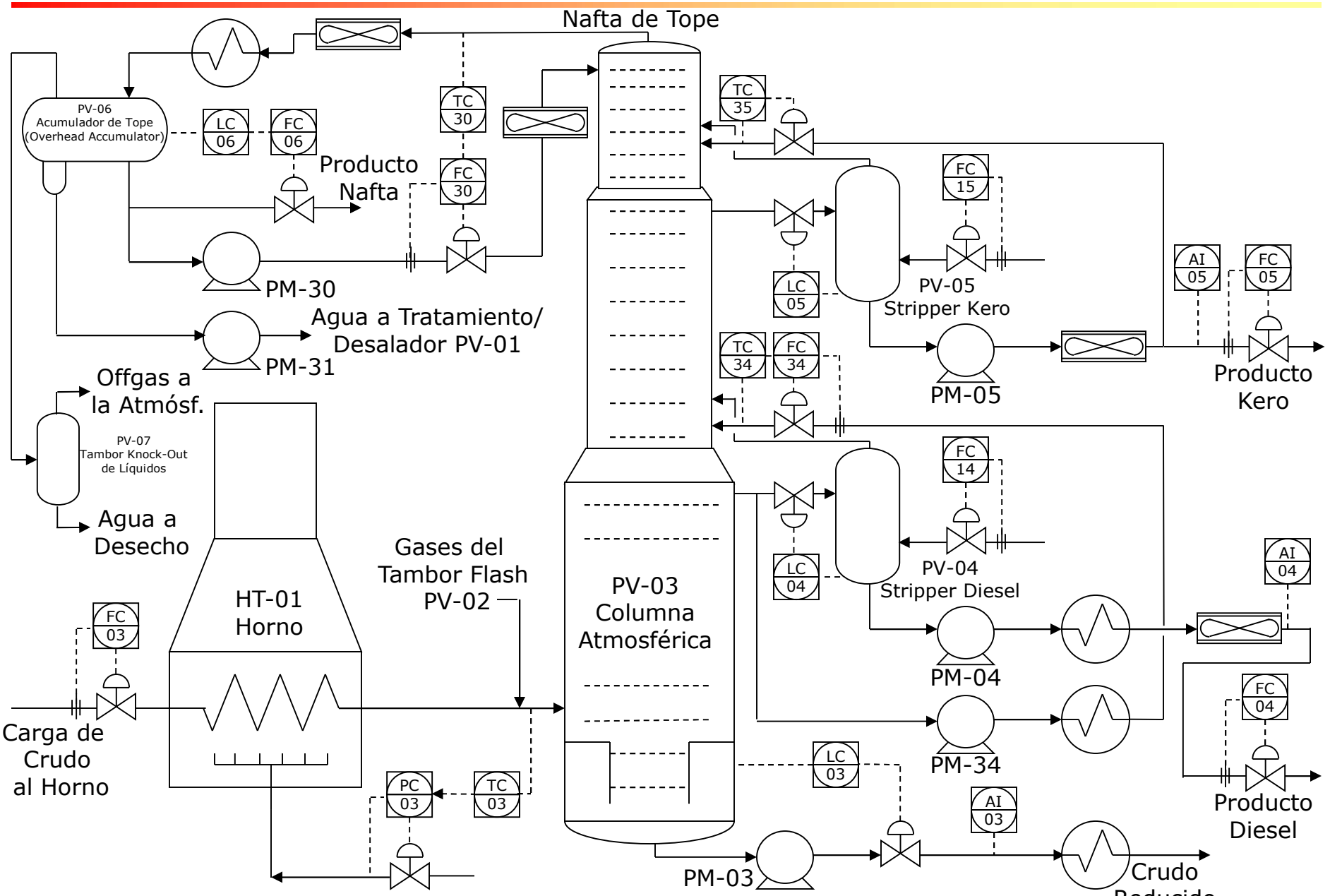
P&ID: Precalentamiento y Desalinización



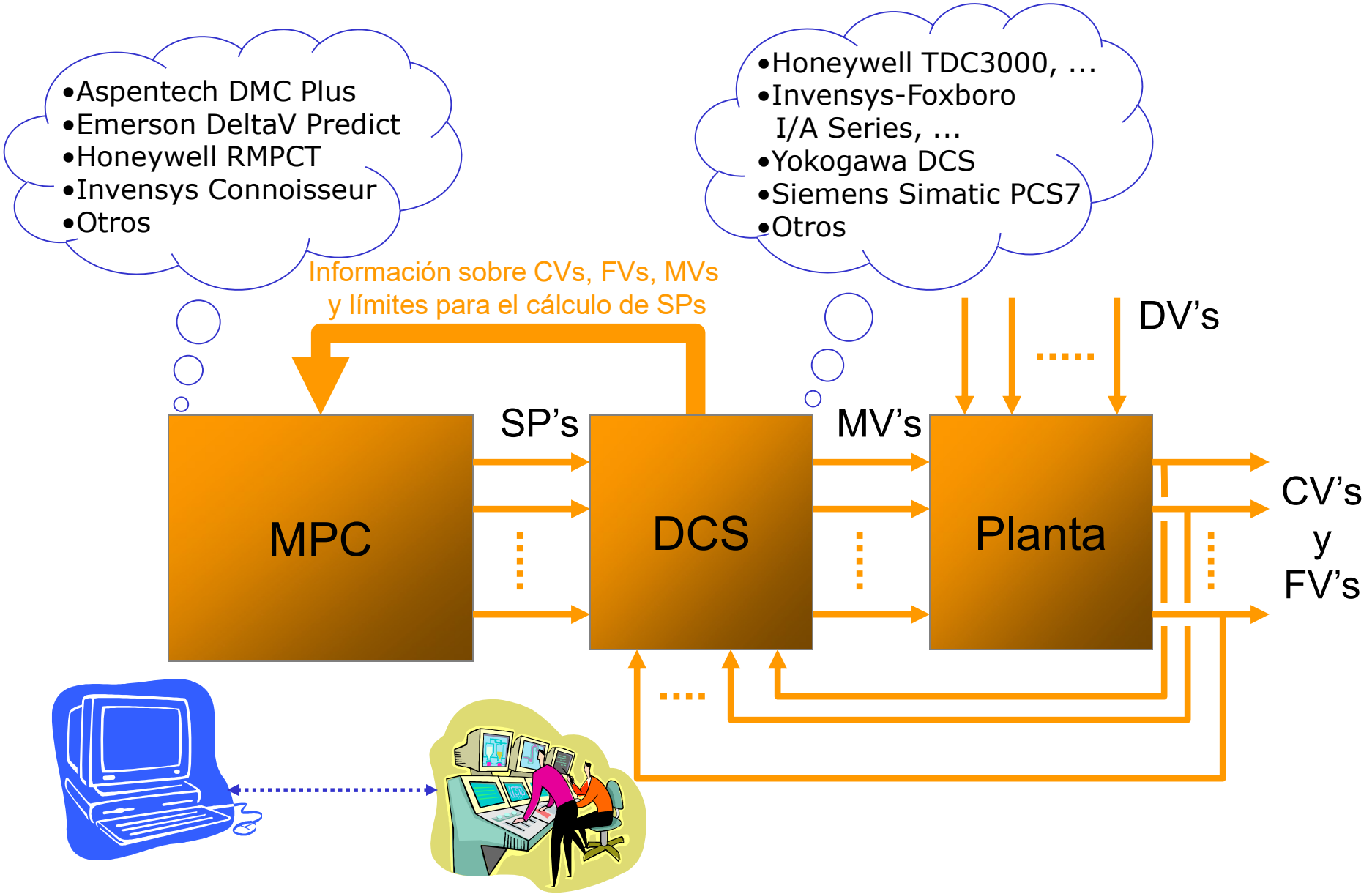
P&ID: Horno y Columna de Destilación



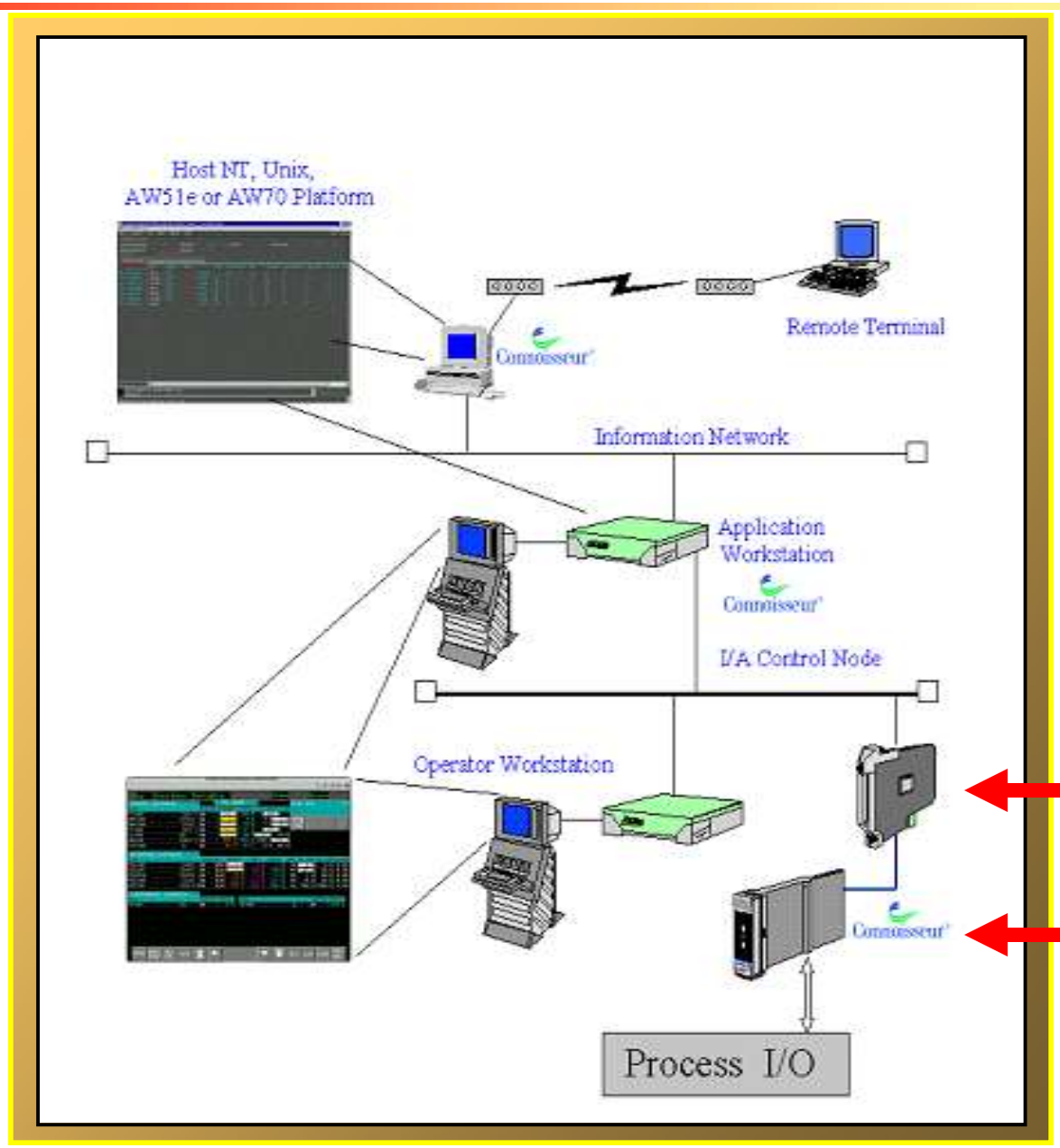
P&ID: Horno y Columna de Destilación



Arquitectura del Sistema MPC-DCS



Ejemplo: Integración del MPC Connoisseur al DCS Foxboro I/A Series

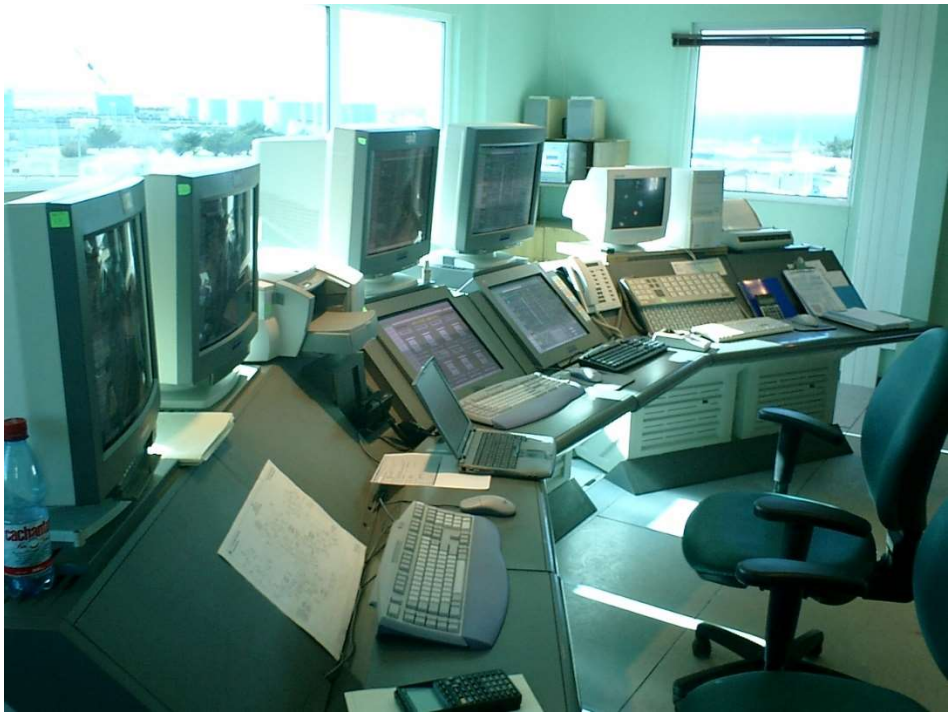


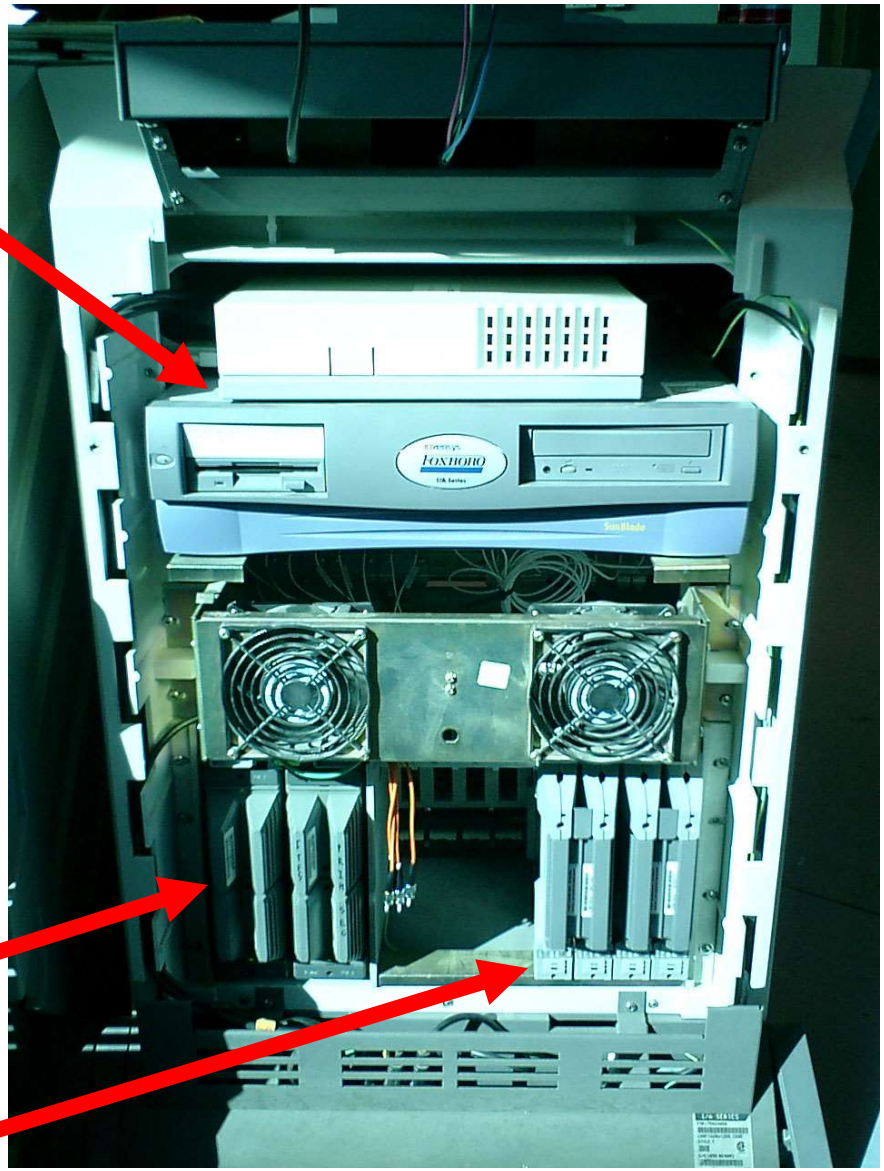
CP40
CP60

Módulos
Fieldbus

DCS – Foxboro I/A Series (Invensys)

AW (Application Workstation)
Estación de Ingeniería
Sparc (OS: Solaris)



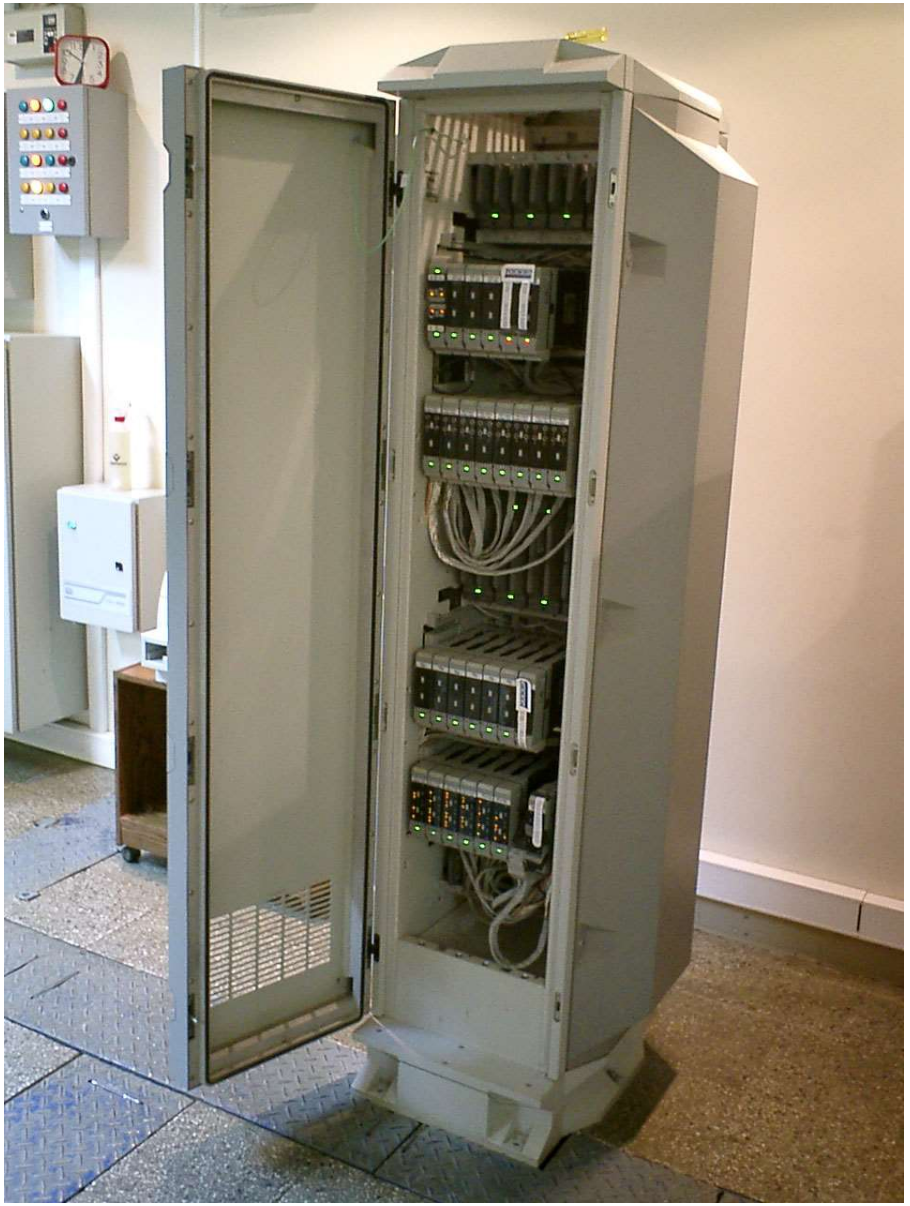


CPs
(Control Processors)

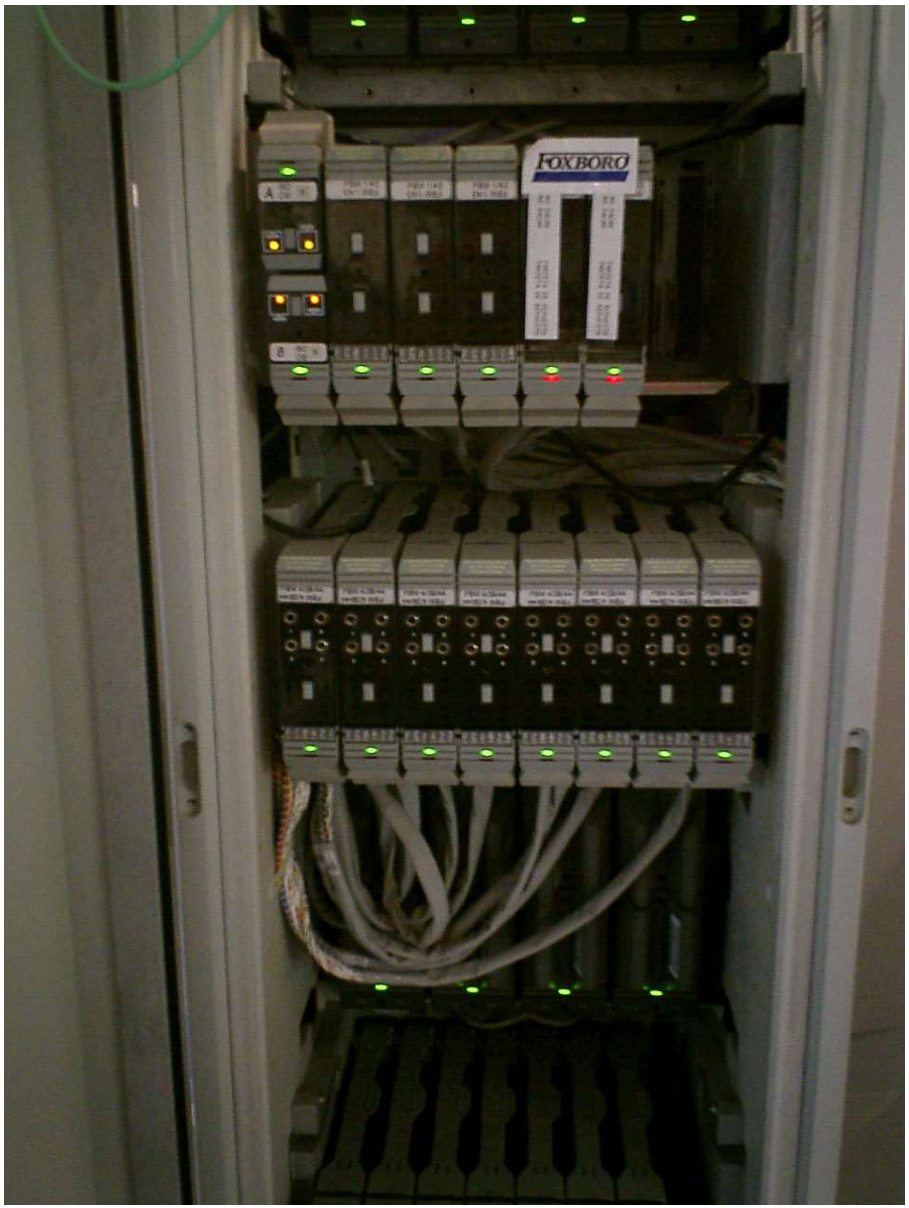
MBPs
(Mathematical Block Processors)

Rack de módulos Fieldbus – Red de Control

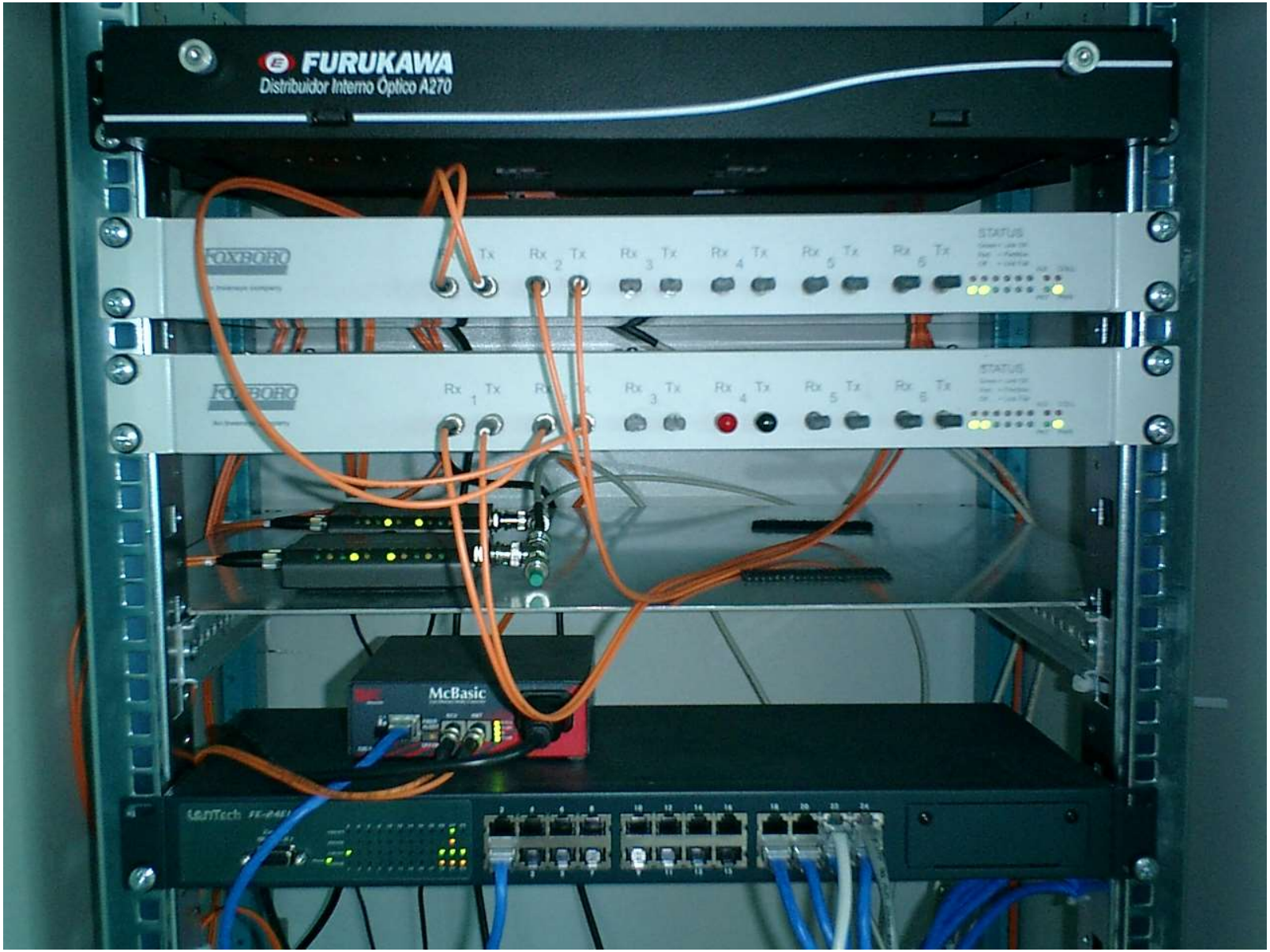




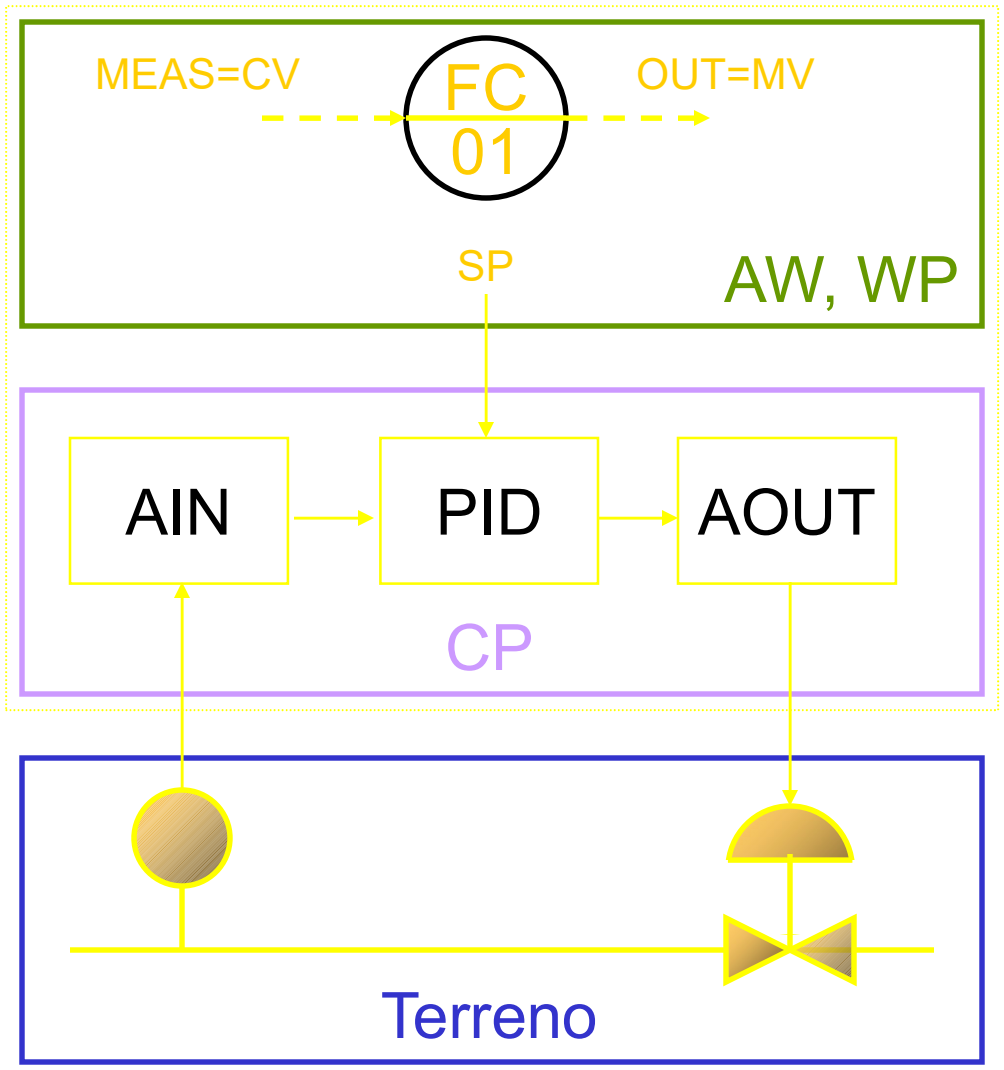
Módulos Fieldbus



Switch de Comunicaciones – Red de Información



Control Básico – *Lazo de Control Simple*

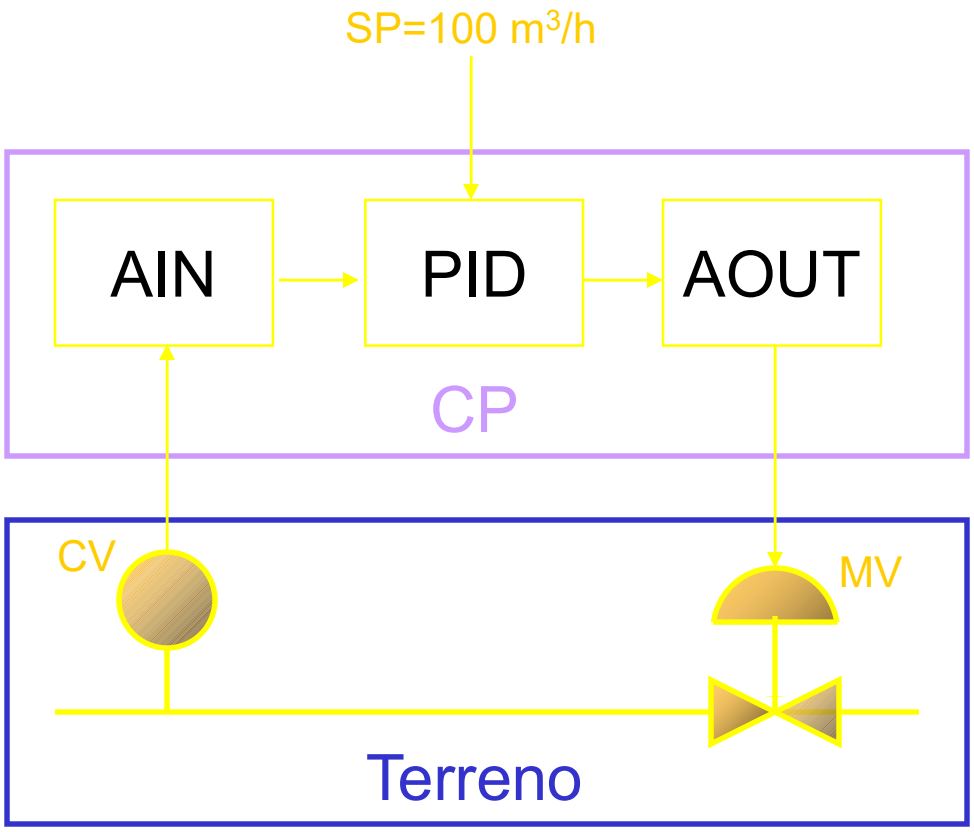


Control Regulatorio Básico

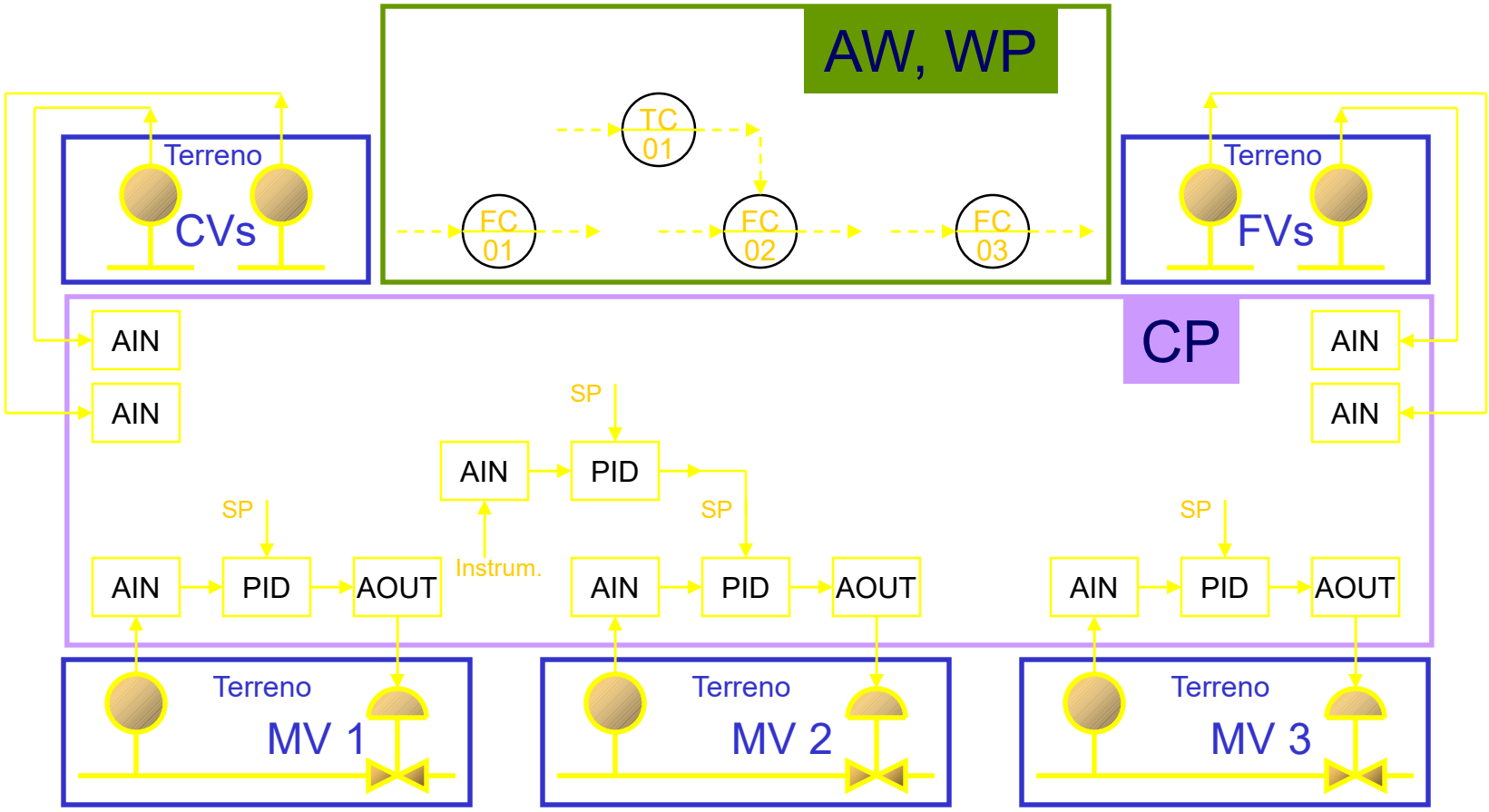
Lazo de Control Simple: 1 CV y 1 MV

Control Básico – *Ejemplo*

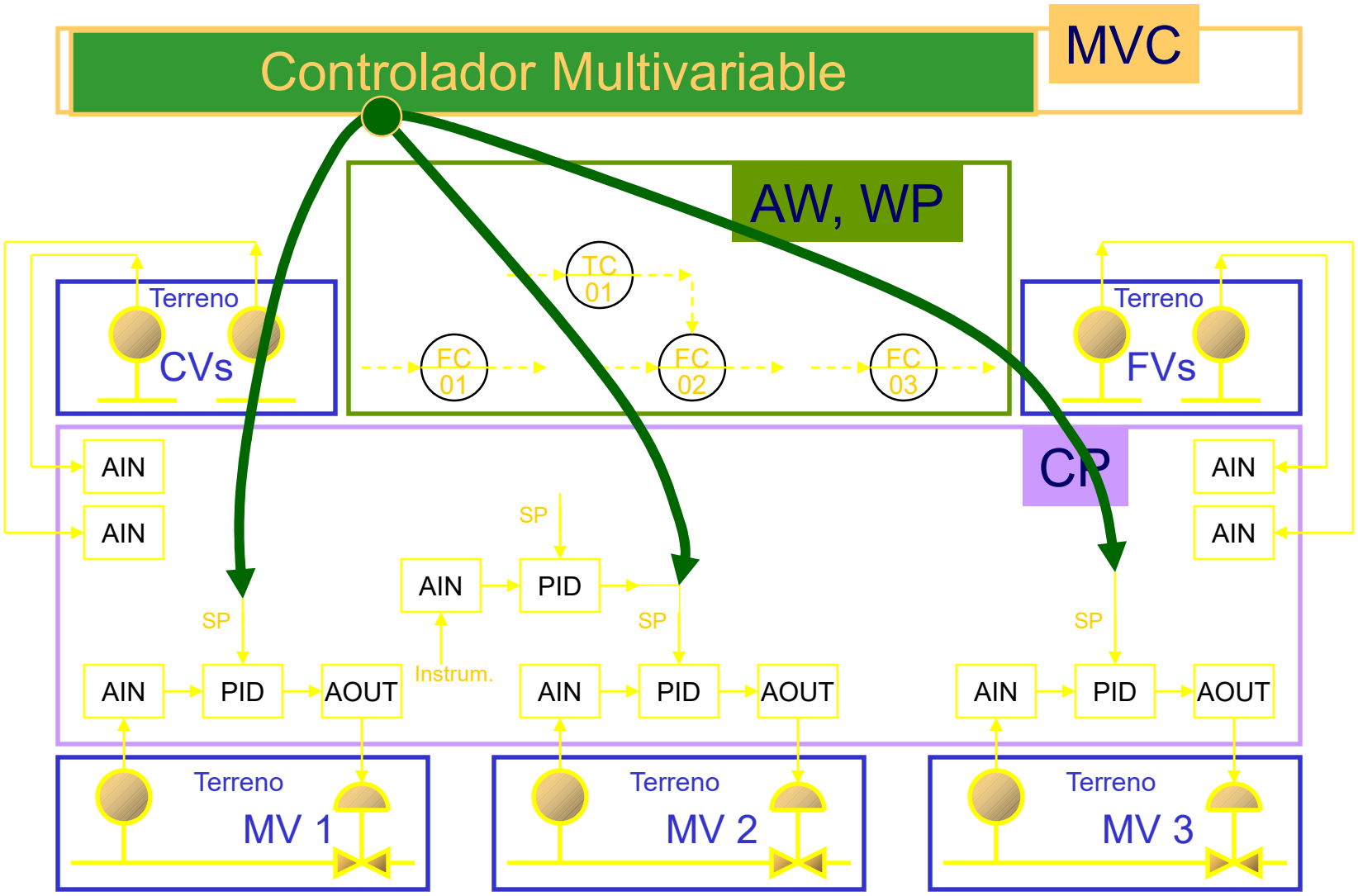
- Control de Flujo de Alimentación



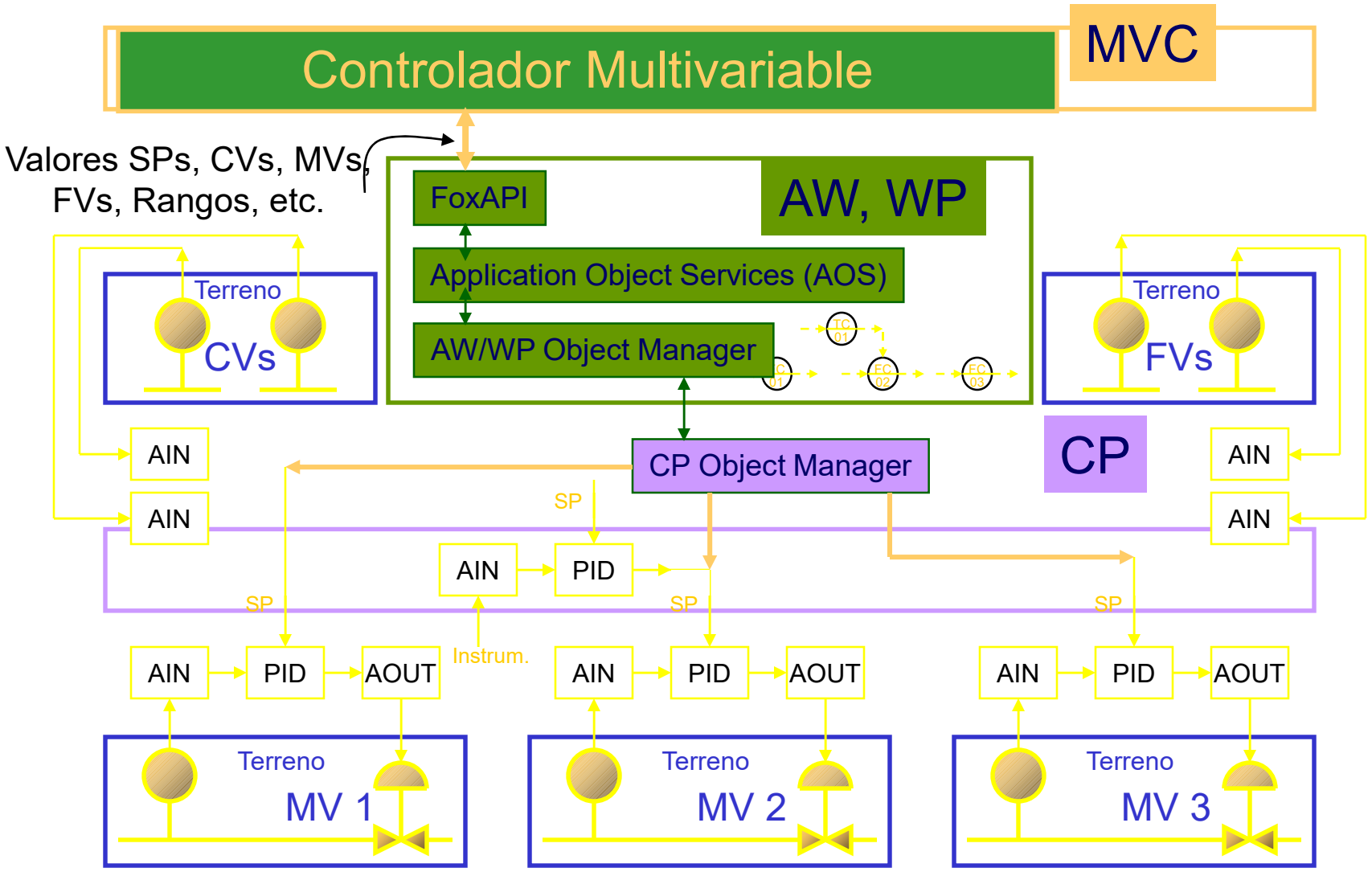
Sistema de Control Distribuido (DCS)

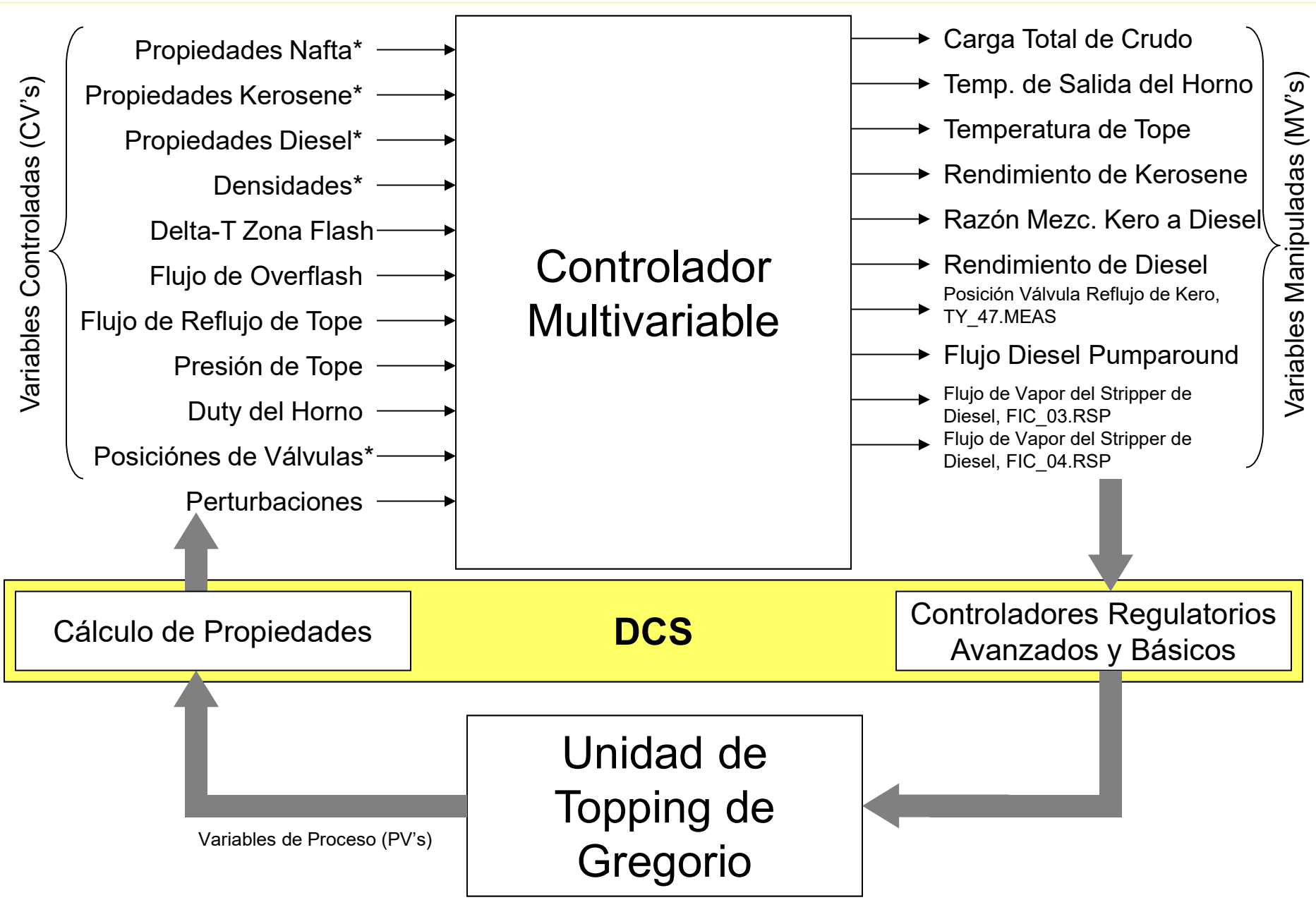


Control Supervisor de Set-Points



Control Supervisor de Set-Points



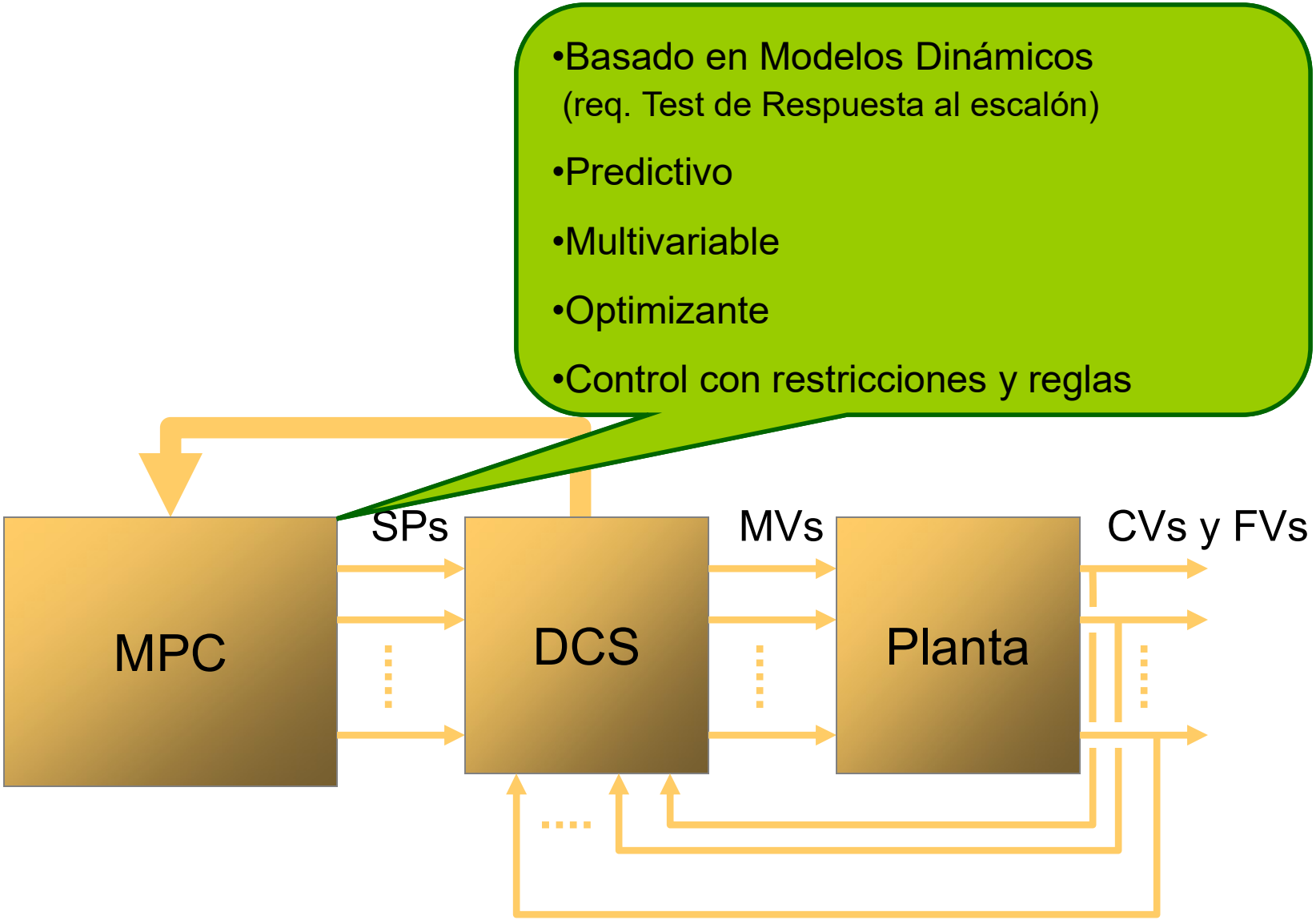


*Nota:

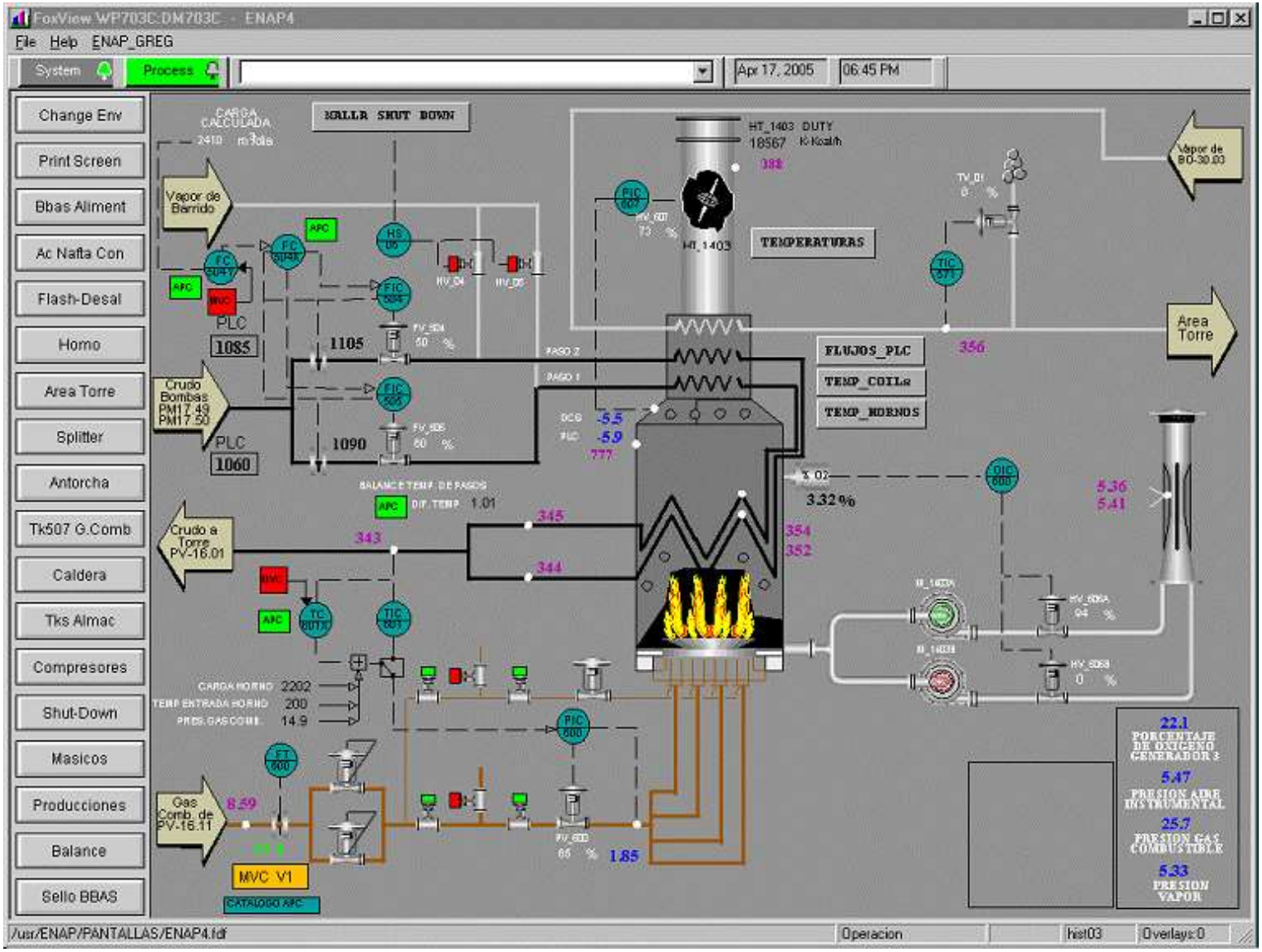
•Propiedades de la Nafta: 90%. Propiedades del Kero: Pto. Inflamación, Final de Ebullición, Congelación. Propiedades del Diesel: Pto. Inflamación. Propiedades del Diesel Mezcla: Pto. Inflamación, 90%, Escurrimiento, Nube, Viscosidad, CFPP. Densidades de Nafta, Kero y Diesel.
•Posición de las Válvulas de Flujo de: Alimentación LIC_507.OUT, Extracción Total de Kero FIC_500.OUT, Mezcla Kero a Diesel FIC_501.OUT, Extracción Diesel a Almacenamiento FIC_503.OUT, Reflujo de Diesel FIC_510.OUT. Posición de las Válvulas de Nivel del: Stripper de Kero LIC_501.OUT, Stripper de Diesel LIC_66.OUT.
•Delta-T Zona Flash: TE_601A.MEAS – TE_53.MEAS. Perturbaciones: Densidad de la Alimentación, Nafta Pesada a Diesel FIC_204A.

MVC-TOPPING-GREGORIO

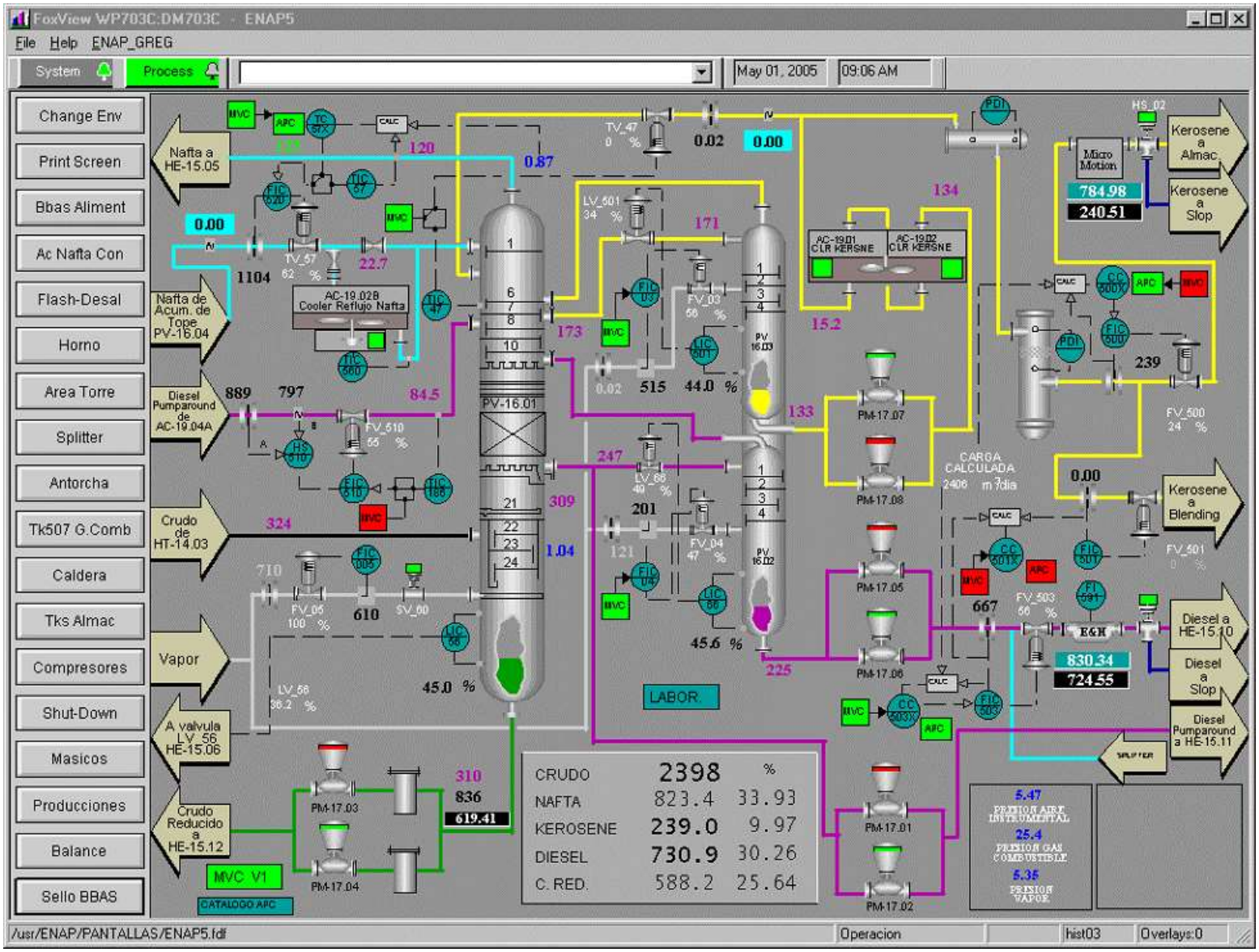
Caraterísticas del Control Multivariable



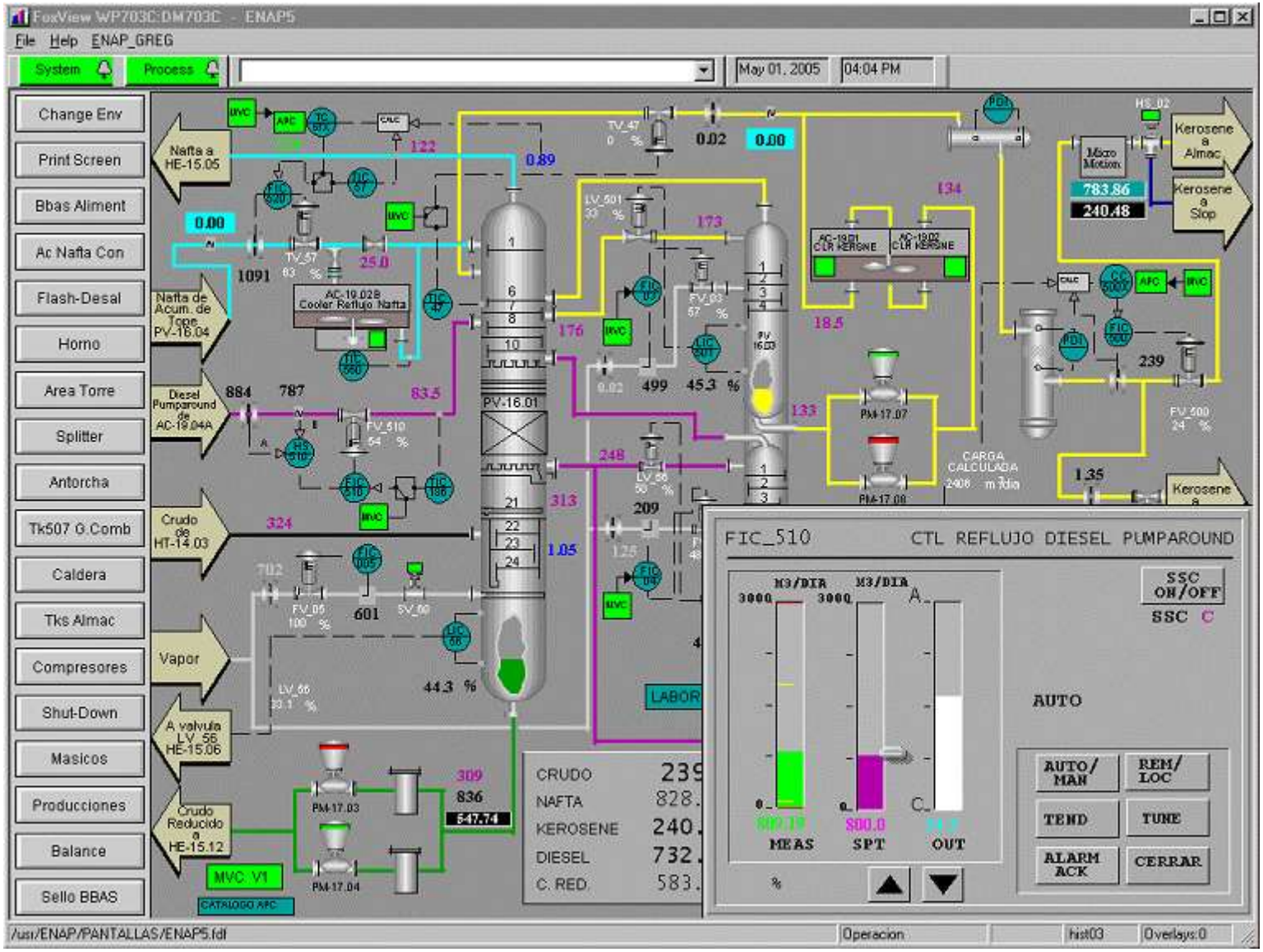
Pantalla Horno HT_14.03



Pantalla Topping – PV_16.01



Pantalla Topping – PV_16.01 – SSC ON/OFF



Pantalla Connoisseur del DCS – MVC_V1 (CV #1)



Pantalla Connoisseur del DCS – MVC_V1 (CV #2)



Proceso de Diseño de Controladores 1/3

Objetivo: Diseñar un sistema de control que satisfaga ciertas especificaciones.

Información necesaria en el nivel de abstracción:

1. Una descripción de la planta o proceso: un modelo matemático.
2. Carectirización del input de referencia $r(t)$, y la perturbación $d(t)$, para $t \geq 0$.
3. Especificaciones de desempeño, e.g.:
   a) *Estabilidad* (definida como respuesta limitada -acotada- de la salida para un input de comando limitado; siempre requerida).
   b) *Especificaciones de la Respuesta Transiente*, e.g. suave, rápida, sin sobresaltos, ante un cambio de escalón en el valor de referencia.

3. (cont.) Especificaciones de desempeño, e.g.:

c) Especificaciones de la respuesta en regimen permanente (steady state response); típicamente especifcada como $e(t) \to 0$ para $t \to \infty$, esto es lo que se denomina *cero error de régimen permanente*, formalmente:

$$\lim_{t \to \infty} e(t) = 0$$



Proceso de Diseño de Controladores 3/3

4. Modelos matemáticos de actuadores y sensores, y la caracterización del ruido de medición.
5. Restricciones a la estructura del controlador, por ejemplo, la salida del controlador puede estar restringida a términos propocional, integral y derivativo del error (controlador PID):

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}; \ t \geq 0$$

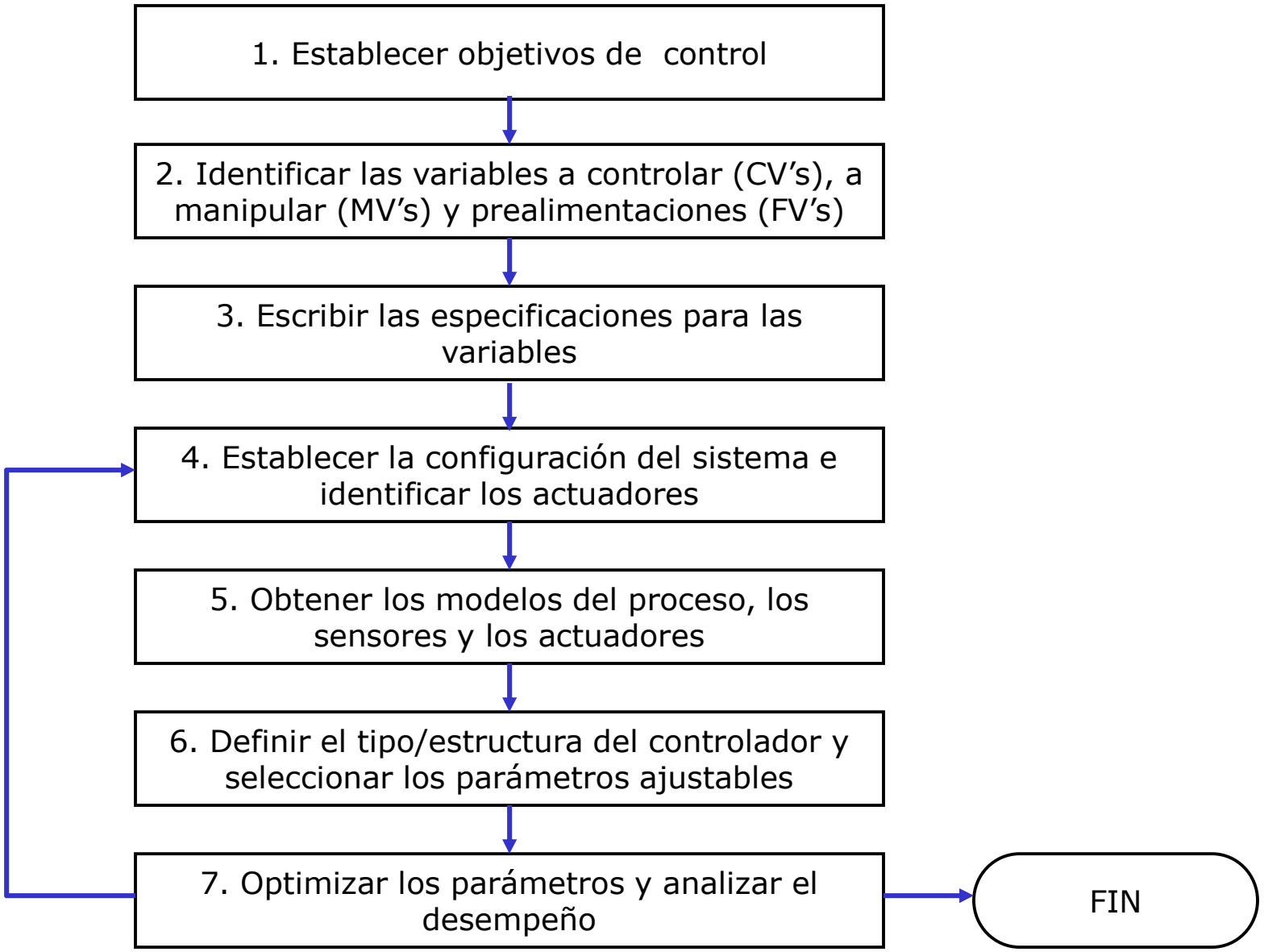
Aspectos Físicos a Considerar en el Diseño

1. Selección de actuadores y sensores.
2. Selección de elementos de control, hardware computacional y software.
3. Diseño de la interfaz de operador (también llamada interfaz humano-máquina, *HMI: human-machine interface*).
4. Definiciones de condiciones de alarma y procedimientos de respaldo (backup), selección de dispositivos de despliegue.

<u>El Diseño como un Proceso Iterativo</u>



Proceso General de Diseño de Sistemas de Control



Si el desempeño no logra las especificaciones, entonces se debe iterar la configuración y actuador.

Si el desempeño logra las especificaciones, se finaliza el diseño.

Referencias Adicionales

- G. F. Franklin, J. D. Powell, A. Emami-Naeini. *Feedback Control of Dynamic Systems*. 4ª ed. (1ª ed. 1986), Prentice Hall, 2002.

- G. C. Goodwin, S. F. Graebe, M. E. Salgado. *Control System Design*. Prentice Hall, 2001.

- Historia del Control (en español): http://www.control-systems.net/recursos/historia/historia_inicios.htm