

**materia**

**Instrumentación e Control de Procesos**

**unidade didáctica 1**

# **Introdución ao control de procesos químicos**

**Ana M<sup>a</sup> Soto Campos**

Departamento de Enxeñaría Química  
Escola Técnica Superior de Enxeñaría



VICERREITORÍA DE ESTUDANTES,  
CULTURA E FORMACIÓN CONTINUA





unidade didáctica 1

# Introdución ao control de procesos químicos

Ana M<sup>a</sup> Soto Campos

Departamento de Enxeñaría Química  
Escola Técnica Superior de Enxeñaría



© Universidade de Santiago de Compostela, 2013



Esta obra atópase baixo unha licenza Creative Commons BY-NC-SA 3.0. Calquera forma de reprodución, distribución, comunicación pública ou transformación desta obra non incluída na licenza Creative Commons BY-NC-SA 3.0 só pode ser realizada coa autorización expresa dos titulares, salvo excepción prevista pola lei. Pode acceder Vde. ao texto completo da licenza nesta ligazón: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/es/legalcode.g>

Deseño  
Unidixital  
Servizo de Edición Dixital  
da Universidade de Santiago de Compostela

Edita  
Vicerreitoría de Estudantes,  
Cultura e Formación Continua  
da Universidade de Santiago de Compostela  
Servizo de Publicacións  
da Universidade de Santiago de Compostela

Imprime  
Unidixital  
Dep. Legal: C 53 - 2013  
ISBN 978-84-9887-960-5

**ADVERTENCIA LEGAL:** reservados todos os dereitos. Queda prohibida a duplicación, total ou parcial desta obra, en calquera forma ou por calquera medio (elec-trónico, mecánico, gravación, fotocopia ou outros) sen consentimento expreso por escrito dos editores.

**MATERIA:** Instrumentación e control de procesos  
**TITULACIÓN:** Grao en Enxeñaría de Procesos Químicos Industriais  
PROGRAMA XERAL DO CURSO  
Localización da presente unidade didáctica

## **BLOQUE TEMÁTICO I: INTRODUCCIÓN**

### **Unidade I. Introducción ao control de procesos químicos**

- Obxectivos do control de procesos
- Control secuencial e control continuo
- O sistema de control de procesos
- Representación de lazos de control
- Estratexias de control
- Niveis de control de procesos
- Deseño do sistema de control

## **BLOQUE TEMÁTICO II: DINÁMICA DE PROCESOS**

### **Unidade II. Modelización do comportamento dinámico de procesos químicos**

- Introdución
- Metodoloxía para a determinación de modelos
- Método analítico para a determinación de modelos. Exemplos
- Método empírico de modelización

### **Unidade III. Análise dinámica de procesos**

- Introdución
- Resposta dinámica dun modelo integrador
- Resposta dinámica dun modelo de primeira orde
- Resposta dinámica dun modelo de primeira orde con tempo morto
- Resposta dinámica dun modelo de segunda orde
- Resposta dinámica de sistemas máis complicados

## **BLOQUE TEMÁTICO III: CONTROL DE PROCESOS**

### **Unidade IV. Instrumentación para o control de procesos. Modelización**

- Introdución
- Características básicas dos instrumentos de medición e actuación
- Instrumentos de medición/transmisión
- Instrumentos de actuación
- Controladores de realimentación

### **Unidade V. Análise dinámica de lazos de realimentación ou *feed-back***

- Introdución
- Modelización e análise dinámica dun lazo de realimentación
- Análise dinámica de diferentes lazos de control

### **Unidade VI. Estabilidade de lazos de realimentación**

- Criterio xeral de estabilidade
- Método de Routh
- Método de substitución

### **Unidade VII. Métodos de axuste de controladores**

- Criterios de axuste de controladores
- Métodos de axuste de controladores

## **Unidade VIII. Outros sistemas de control**

Control multivariable

Control en cascada

Control anticipativo ou *feed-forward*

Control primario mediante CLP

## ÍNDICE

---

<b>Presentación</b> .....	7
<b>Os obxectivos</b> .....	7
<b>A metodoloxía</b> .....	7
<b>Os contidos</b> .....	8
1. Obxectivos do control de procesos .....	8
2. Control secuencial e control continuo .....	8
3. O sistema de control de procesos.....	9
3.1. Elementos constituíntes .....	11
3.2. Operacións .....	11
3.3. Terminoloxía .....	12
4. Representación dos lazos de control .....	13
4.1. Diagramas P&I .....	13
4.2. Diagramas de bloques .....	16
5. Estratexias de control.....	18
5.1. Control de realimentación ou <i>feed-back</i> .....	18
5.2 Control anticipativo ou <i>feed-forward</i> .....	19
6. Niveis de control de procesos .....	20
6.1. Control básico .....	22
6.2 Control avanzado .....	24
6.3 Control multivariable .....	25
6.4 Optimización <i>on-line</i> .....	26
7. Deseño do sistema de control.....	26
<b>Actividades propostas</b> .....	27
<b>Avaliación da UD</b> .....	27
<b>Bibliografía</b> .....	28



## PRESENTACIÓN

---

A presente Unidade Didáctica (en diante UD) encádrase no primeiro Bloque da materia “Instrumentación e Control de Procesos” do terceiro curso do Grao en Enxeñaría de Procesos Químicos Industriais. É a única UD do bloque introdutorio. Pretende dar unha idea global de que é o control de procesos químicos e cal é a súa utilidade, cales son as técnicas dispoñíbeis e a instrumentación necesaria para implementalas. Amosará ao alumnado que dependendo dos obxectivos e investimentos a realizar, poden deseñarse dende sistemas de control moi básicos ata os máis complexos. Esta unidade permitirá adquirir a linguaxe propia do control de procesos e recoñecer as súas representacións, establece por tanto a base da disciplina. A unidade será impartida en nove horas: seis de contidos teóricos, dúas de traballo do alumnado en clases interactivas e unha hora de avaliación.

Polo seu carácter xeral, esta UD é idónea non só no Grao para o que está formulada senón para todos aqueles que desexen “entender” o control de procesos sen entrar nos seus aspectos cuantitativos. Neste caso, a duración da docencia depende dos obxectivos do profesor

## OS OBXECTIVOS

---

O obxectivo xeral desta UD é introducir ao alumnado no control de procesos químicos. Ao rematar a UD o estudiantado será capaz de:

- Entender a importancia do control de procesos e a súa relación coas outras materias do Grao
- Diferenciar entre control secuencial e control continuo
- Distinguir entre estratexias sinxelas e avanzadas de control
- Interpretar os diagramas P&I
- Representar os lazos de realimentación ou *feed-back* mediante diagramas P&I e de bloques
- Coñecer as etapas que cómpre desenvolver para chegar a controlar os procesos químicos

## A METODOLOXÍA

---

Nas **clases expositivas** expoñeranse os principios teóricos e os contidos fundamentais da UD utilizando os medios audiovisuais da aula. Antes da clase, o alumnado terá a súa disposición, no entorno virtual, unha copia do material utilizado polo profesorado. A pesar de seguir o modelo de conferencia, incentivarase a participación continua dos estudantes.

Nas **clases interactivas**, o profesorado formulará unha serie de actividades que consoliden e xeneralicen os coñecementos cos que o alumnado se familiarizou nas clases expositivas. O docente será o condutor dos traballos que se realizarán en grupos reducidos.

Nas **titorías en grupo** resolveranse dúbidas formuladas polo propio alumnado ou polo profesor.

## OS CONTIDOS

---

### 1. Obxectivos do control de procesos

Os procesos industriais non son estáticos, polo contrario son moi dinámicos, cambian continuamente debido a moitos tipos de perturbacións (trocós na calidade das materias primas, nos caudais, temperatura ambiente...). Se non se emprenden as accións pertinentes, as variables importantes do proceso, é dicir, aquelas que se relacionan coa seguridade e os índices de produción, non cumpriran coas condicións de deseño. Precisamente por iso se necesita que os sistemas de control vivien continua e automaticamente as variacións que se deben controlar. O obxectivo do control automático de procesos é por tanto, manter en determinado valor de operación as variables do proceso tales como: temperaturas, presións, caudais, composicións...

O control de procesos en xeral, e químicos en particular, é importante por:

- **Seguridade**, é sempre a consideración máis importante. Calquera sistema de control debe proporcionar unha operación estable (sen grandes oscilacións) e segura da planta, evitando lesións ao persoal ou dano ao equipo.
- **Manter a calidade do produto** (composición, pureza, color, etc.) que debe axustarse á demandada en cada momento.
- **Manter a produción** da planta.
- **Respecto ao medio ambiente**, mantendo as emisións dentro dos parámetros legislativos.

Os sistemas de control máis avanzados, permitirán ademais o cumprimento de todos estes obxectivos a custo mínimo.

En resumo, pódese dicir que as razóns da automatización das plantas de proceso son proporcionar un entorno seguro e á vez manter a calidade desexada do produto e alta eficiencia da planta, con redución da demanda de traballo humano [1].

### 2. Control secuencial e control continuo

O control todo-nada, ou control *on-off*, é a forma máis simple de control [2]. Neste sistema de control, o que interesa é o estado das variables que soamente pode tomar un número finito de valores: válvula aberta ou pechada, reactor baleiro ou non, temperatura alcanzada ou non, etc. No exemplo da figura 1.1, se o transmisor do nivel do líquido (LT) indica que se

alcanzou o nivel máximo permitido no tanque, o controlador (CLP) manda abrir a válvula de saída. O controlador unicamente pode recibir dúas posibles entradas (hai nivel ou non hai nivel), nunca o valor cuantitativo do nivel.

O control todo-nada é a base do control secuencial onde se establecen secuencias ordenadas de actuacións *on-off*. Este tipo de control, hoxe en día maioritariamente desenvolvido mediante **Controladores Lóxico Programables**, CLPs (PLCs en inglés), utilízase sobre todo para a posta en marcha de procesos, para o control de procesos descontinuos ou para sistemas de seguridade.

No entanto, desde o punto de vista do control de procesos químicos, e dado que estes na súa gran maioría son procesos continuos, é de moito maior interese un control continuo centrado no valor das variables (Ex: nivel en centímetros do líquido no tanque), e en que este parámetro non se vaia do valor desexado para o mesmo. O sistema de control continuo máis habitual na industria de proceso é o sistema de control de realimentación ou *feed-back*.

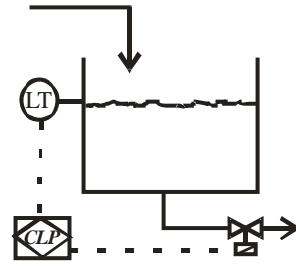


Figura 1.1. Control de nivel todo-nada

### 3. O sistema de control XYdfcWgcg

Considérese un intercambiador de calor no cal a corrente de proceso se quenta mediante vapor de condensación como se ilustra na figura 1.2.

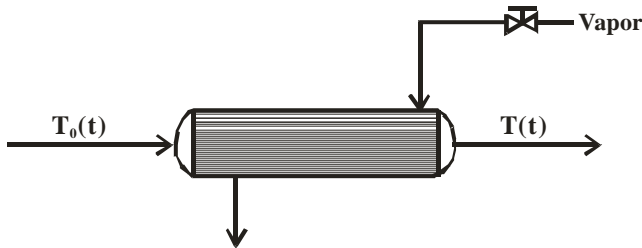


Figura 1.2. Intercambiador de calor

O propósito da unidade é quentar o fluído que se procesa dende unha temperatura de entrada,  $T_0(t)$ , a unha temperatura de saída,  $T(t)$ . Ambas as temperaturas son variables co tempo precisamente debido ás pequenas perturbacións existentes no proceso que lles poden afectar. O medio de quentamento é o vapor que condensa e a enerxía que gaña o fluído no proceso é igual ao calor que libera o vapor, sempre e cando non haxa perdas de calor ao exterior.

O obxectivo dun sistema de control sería manter a temperatura de saída do intercambiador no valor que se desexa. Neste proceso existen moitas variables que poden trocar, o cal ocasionaría que a temperatura de saída se desviase do valor desexado, se isto chega a suceder débense emprender algunhas accións para corrixir esa desviación [1].

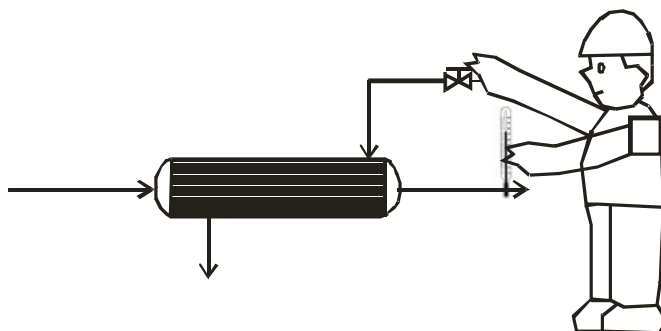


Figura 1.3. Control manual do intercambiador de calor

Unha maneira de lograr este obxectivo é facelo manualmente (Figura 1.3). Para iso, un operario deberá medir continuamente a temperatura de saída do intercambiador e comparala co valor que se require para a mesma. Se os valores coinciden non será necesario actuar, pero se a temperatura medida é superior á desexada, o operario terá que diminuír a apertura da válvula do vapor. Ao diminuír o caudal de vapor, diminúe o calor cedido e a temperatura volta ao punto de consigna. Se polo contrario, a temperatura é inferior á desexada, será necesario abrir un pouco a apertura para que condense maior cantidade de vapor e se corrixa o desvío.

O exemplo refírese a unha unidade de proceso. Unha planta química completa implica centos de variables que se deben manter nun determinado valor, con este procedemento de corrección requiriríase unha cantidade enorme de operarios, algo insostible. A calidade do control nunca sería óptima. Por todo iso, é necesario realizar o control de maneira automática, é dicir, contar con instrumentos que controlen as variables sen necesidade de que interveña o operador. Isto é o que significa o **control automático de procesos**.

Para lograr este obxectivo débese deseñar e implementar un **sistema de control**. Na figura 1.4 amósase un sistema de control e os seus compoñentes básicos.

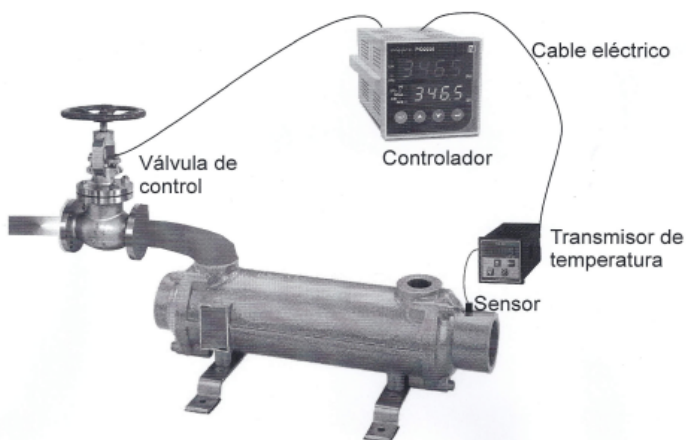


Figura 1.4. Sistema de control do intercambiador de calor

Para medir a temperatura de saída da corrente do proceso utilízase un **sensor**. Na medida da temperatura de maneira automática non se pode usar un termómetro, un sensor habitual é un termopar. O principio físico dun termopar consiste en que cando dous metais *diferentes* se unen, xérase no punto de unión unha forza electromotriz que é función da temperatura. O sensor conéctase fisicamente (mediante un cable axeitado) ao **transmisor**, o cal capta a saída do sensor (variación na forza electromotriz) e a converte nun sinal que o **controlador** poida entender, habitualmente un sinal eléctrico. O controlador recibe o sinal, que está en relación coa temperatura, compárao co valor que se desexa e, segundo o resultado da comparación, decide que facer para manter a temperatura no punto de consigna. Con base na decisión, o controlador envía outro sinal ao **elemento final de control**, que variará o caudal de vapor para corrixir o erro. Esta estratexia de control recibe o nome de control de realimentación ou *feed-back*.

### 3.1. Elementos constituíntes

Os catro compoñentes básicos de todo sistema de control, dende os máis sinxelos aos máis avanzados, son:

- **Sensor**, ou elemento primario, é o encargado de medir a variable física que se quere controlar. Dependendo do tipo de lazo de control, pódense utilizar tamén para medir variables que implican perturbacións no proceso, ou variables secundarias a partir das cales se estima o valor doutras que non poden medirse directamente ou cuxa medición implica un custo inasumible.
- **Transmisor**, ou elemento secundario, é o encargado de transducir o sinal do elemento primario nun sinal axeitado (pneumático, eléctrico ou inalámbrico) no rango utilizado polo controlador.
- **Controlador**, é o "cerebro" do sistema de control, recibe o sinal correspondente á variable medida e calcula a acción do control conforme ao algoritmo programado nel.
- **Actuador ou elemento final de control**, é o elemento que manipula unha variable de proceso conforme co sinal que recibe do controlador. Frecuentemente trátase dunha válvula de control aínda que non sempre. Outros elementos finais de control comunmente utilizados son as bombas de velocidade variable, resistencias eléctricas, motores...

### 3.2. Operacións

Os elementos constituíntes dun lazo de control son os responsables das tres operacións básicas que axeitadamente implementadas levan á eficacia do control automático do proceso:

- **Medición**: a combinación de sensor e transmisor permiten levar a cabo a medición da variable que se controla.
- **Decisión**: con base na medición, o controlador decide que facer para manter a variable no valor que se desexa.

- **Acción:** realizada polo elemento final de control conforme coa decisión tomada polo controlador.

### 3.3. Terminoloxía

Requisito imprescindible na implementación de calquera lazo de control é o **estudo dinámico** do proceso, é dicir, o estudo de como varían as variables do proceso co tempo. Así, no caso do intercambiador de calor, será necesario coñecer como afecta a variación da temperatura de alimentación, ou de calquera outra variable, sobre a temperatura de saída. Coñecer a variación que implica un troco no caudal de vapor sobre a devandita temperatura, permitirá decidir se se podería manipular ese caudal para corrixir os desvíos da variable a controlar.

Asemade, cando o lazo de control xa está implementado, é necesario un estudo dinámico do proceso xa automatizado que permita amosar a eficacia do sistema de control proposto. Se o funcionamento do lazo é correcto, a pesar de que existan pequenos desvíos na temperatura de alimentación ao intercambiador, ou outras perturbacións, a temperatura de saída do mesmo tenderá cara ao valor desexado.

En canto á nomenclatura propia do control do proceso, o primeiro termo implicado é **variable controlada**, esta é a variable que se debe manter ou controlar dentro dalgún valor desexado. No exemplo do intercambiador, a variable controlada é a temperatura de saída  $T(t)$ . **Variable de referencia, punto de control, punto de consigna ou set-point** é o valor que se desexa para a variable controlada. A **variable erro** é a diferenza entre o *set-point* e a medida da variable controlada:

$$E(t) = SP(t) - VM(t)$$

é a variable principal nun sistema de control de realimentación, posto que todo funciona se hai diferenza entre o *set-point* e a variable medida, é dicir se aparece un erro no sistema.

A **variable manipulada** é a variable que se utiliza para manter á variable controlada no *set-point* (ou punto de réxime). No exemplo a variable manipulada é o caudal de vapor. Finalmente, calquera variable que ocasiona que a variable de control se desvíe do punto de control defínese como **variable perturbación**. Na maioría dos procesos existe gran cantidade de perturbacións diferentes, por exemplo, no intercambiador de calor que se mostra na figura 1.2, as posibles perturbacións son a temperatura de entrada no proceso, o caudal da corrente de proceso, a calidade do vapor, as condicións ambientais, a composición do fluído que se procesa, a aparición de depósitos nos tubos, etc. É importante comprender que na industria de procesos, estas pequenas pero inevitables perturbacións son a causa de que se requira o control automático do proceso. Se non houbera alteracións, prevalecerían as condicións de deseño e non se necesitaría supervisar continuamente o proceso.

Nun **circuíto ou lazo aberto de control**, o controlador atópase en modo manual, é dicir, aínda que recibe a información do medidor, o controlador non troca o sinal de saída cara ao elemento final de control. Non se realiza ningunha función relativa a como manter a variable controlada no

punto de control. Nun **control de circuío pechado ou lazo pechado**, o controlador atópase en modo automático, continuamente compara o valor da variable medida co *set-point* e determina a acción para corrixir que envía ao elemento final de control.

Xa coa terminoloxía propia desta disciplina, o obxectivo do control automático do proceso pódese establecer como segue [1]:

O obxectivo do sistema de control automático de procesos é usar a variable manipulada para manter á variable controlada no punto de consigna a pesar das perturbacións.

## 4. Representación dos lazos de control

Os lazos de control dun proceso fundamentalmente represéntanse mediante dous tipos de diagramas: diagramas de proceso e instrumentación, P&I, e diagramas de bloques.

### 4.1. Diagramas P&I

Son unha representación gráfica consistente no diagrama da instrumentación para o control superposto ao diagrama de fluxo do proceso. Obtense un novo diagrama onde se localizan e identifican todos os instrumentos e partes dos equipos implicados no control.

Existe unha simboloxía característica [3] para representar os instrumentos de medida, control e actuación, así como os sinais que se usan para a comunicación entre os instrumentos. A máis estandarizada é a proposta pola *Instrumentation, Systems, and Automation Society* (ISA). A figura 1.5 mostra algúns dos símbolos máis habituais usados en diagramas P&I.



Figura 1.5. Simboloxía da instrumentación nos diagramas P&I

Os sinais que se usan para a comunicación entre os instrumentos dun sistema de control tamén están estandarizados (figura 1.6). O sinal pneumático de aire a presión transmitido mediante un tubo de nylon, PVC, poliuretano...foi antigamente moi usado, nas plantas de proceso químico

hoxe en día úsase maioritariamente para as válvulas pneumáticas. Normalmente abarca entre **3 e 15 psig**, con menor frecuencia úsanse sinais de 6 a 30 psig ou de 3 a 27 psig. O sinal eléctrico ou electrónico a día de hoxe é o máis usado, normalmente toma valores entre **4 e 20 mA**. O uso de 10 a 50 mA, de 1 a 5 V ou de 0 a 10 V é menos frecuente. A tendencia actual [2] é a utilización de instrumentos intelixentes comunicados mediante un bus de campo como *Fieldbus* ou *Profibus* que utilizan sinais dixitais transmitidos mediante un medio eléctrico, óptico ou sen fíos, ou como *Hart* que combina sinal dixital e analóxico. Ademais trabállase con sistemas de control distribuídos entre varios ordenadores (Sistema de Control Distribuído ou SCD) comunicados frecuentemente mediante ethernet.

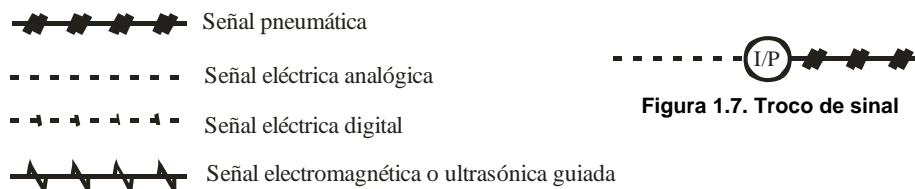


Figura 1.7. Troco de sinal

Figura 1.6. Sinais de comunicación entre instrumentos

Frecuentemente é necesario trocar un tipo de sinal por outro, isto faise mediante *un transdutor*, por exemplo, cando se necesita trocar dun sinal eléctrico, mA, a un pneumático, psig, utilízase un transdutor (I/P) que transforma o sinal de corrente (I) en pneumática (P), como se ilustra graficamente na figura 1.7. O sinal de entrada pode ser de 4 a 20 mA e o de saída de 3 a 15 psig. Existen moitos outros tipos de transdutores: pneumático a corrente (P/I), voltaxe a pneumático (E/P), pneumático a voltaxe (P/E), etc.

A identificación dun instrumento nun diagrama P&I consta de dúas partes, unha identificación funcional e unha de lazo. A primeira consta como mínimo de dúas letras (máximo catro), sendo a primeira a indicación da variable de proceso (L: nivel, T: temperatura, P: presión, F: caudal...) e a segunda describe a función do proceso (E: elemento, T: transmisor, C: controlador, V: válvula de control...). Ambas as letras poden presentar modificadores que aporten maior información. Os modificadores da primeira letra poden indicar diferenza (D), relación (F), etc., e os da segunda refírense ás funcións pasivas do elemento (I: Indicador, R: Rexistrador...). O identificador de lazo consta dun número de lazo e un sufixo opcional (por exemplo se hai dous instrumentos iguais no mesmo lazo). A táboa 1.1 amosa o significado de cada unha das letras que se utilizan para identificar instrumentos.

**Táboa 1.1. Letras de identificación dos instrumentos**

	<b>Primeira letra</b>		<b>Letras sucesivas</b>		
	Primeira letra	Modificador	Función pasiva, lectura	Función saída	Modificador
A	Análise		Alarma		
B	Combustión		Libre	Libre	Libre
C	Libre			Control	
D	Densidade/ Peso específico	Diferencial			
E	Tensión/Voltaxe		Elemento primario		
F	Caudal	Relación			
G	Libre		Visor/Vidro		
H	Manual				Alto
I	Intensidade		Indicador		
J	Potencia	Exploración/ Mostreo			
K	Tempo	Razón de cambio de tempo		Estación de control	
L	Nivel		Luz piloto		Baixo
M	Humidade	Momentáneo			Medio
N	Libre		Libre		Libre
O	Libre		Orificio		
P	Presión/Baleiro		Punto proba		
Q	Cantidade	Integración			
R	Radiación		Rexistrador		
S	Velocidade/ Frecuencia	Seguridade		Interruptor	
T	Temperatura			Transmisor	
U	Multivariable		Multi-función	Multi-función	Multi-función
V	Vibración			Válvula	
W	Peso/Forza		Pozo		
X	Sen clasificar	Eixe X	Sen clasificar	Sen clasificar	Sen clasificar
Y	Evento/Estado/ Presenza	Eixe Y		Relé, conversor, ordenador	
Z	Posición/ Dimensión	Eixe Z		Actuador sen clasificar	

A continuación amósanse algúns exemplos da identificación funcional de instrumentos:

CAH: Alarma de control de nivel alto

FIG: Indicador de caudal con visor  
 FRC: Controlador de relación de caudal  
 HS: Interruptor manual  
 LIC: Controlador e indicador de nivel  
 PC: Controlador de presión  
 PDT: Transmisor de presión diferencial  
 PTY: Transmisor e convertidor a bus de campo de presión  
 TT: Transmisor de temperatura  
 TY: Relé de temperatura  
 ZC: Controlador de posición

Segundo isto, a representación axeitada para o sistema de control amosado na figura 1.4 represéntase na figura 1.8.

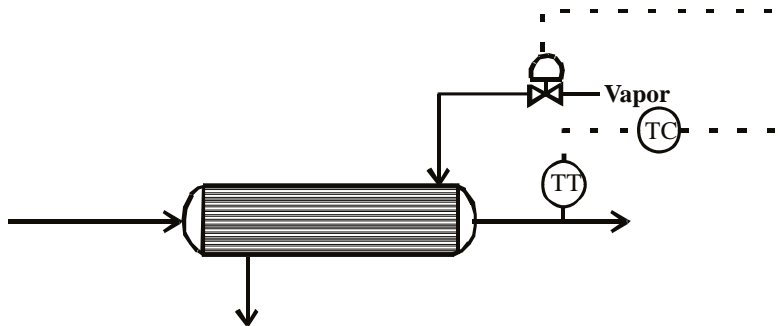


Figura 1.8. Diagrama P&I do intercambiador de calor

## 4.2. Diagramas de bloques

Outra representación dos lazos de control son os **diagramas de bloques**. É unha representación gráfica construída usando elementos básicos para representar a relación entre as variables en estudo dun determinado proceso. Permiten unha visualización eficiente e rápida das características dinámicas e dos efectos de determinadas variables sobre outras que dependen delas. Estes diagramas poden indicar claramente o camiño e a transformación das variables nas partes dun proceso ou entre o proceso e os instrumentos conectados a el para o seu control. Os elementos básicos utilizados nestes diagramas amósanse na figura 1.9.

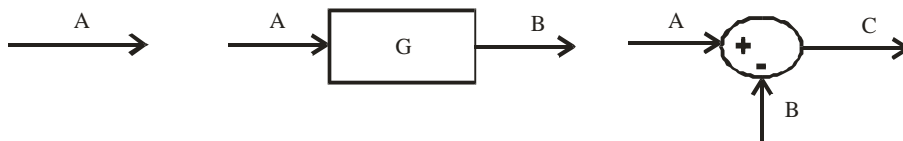
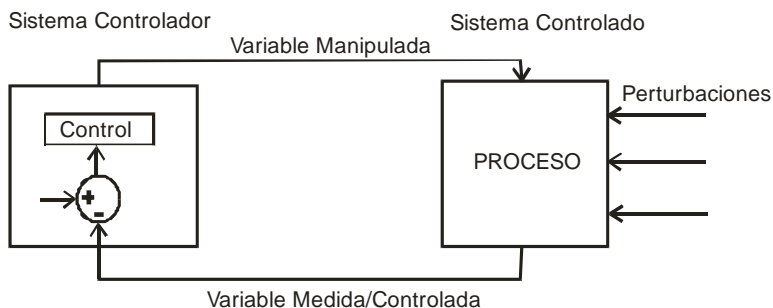


Figura 1.9. Elementos característicos dun diagrama de bloques

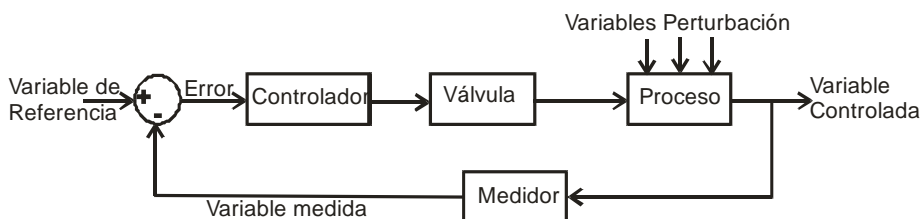
As frechas representan as variables do proceso e constitúen as liñas de conexión entre bloques e círculos. Os bloques indican a relación

funcional entre a variable de saída e de entrada ao bloque,  $B=G \cdot A$ , sendo G a función que establece esa relación. Por último, os círculos indican unha operación alxebrica entre variables.

A figura 1.10 amosa os dous subsistemas básicos dun lazo de control *feed-back* (proceso e controlador) [4] e a figura 1.11 amosa o diagrama de bloques.

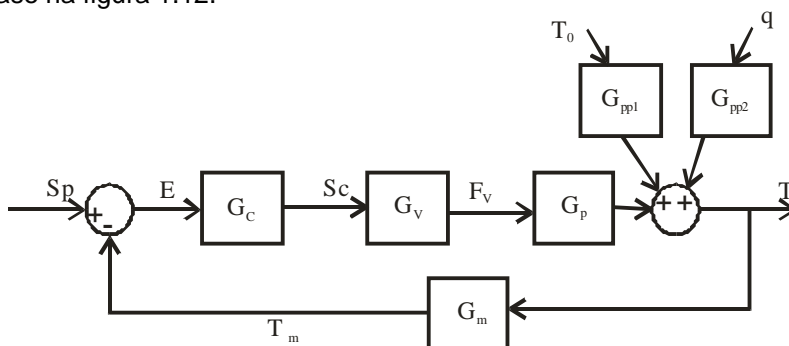


**Figura 1.10. Subsistemas dun lazo de control *feed-back***



**Figura 1.11. Diagrama de bloques dun lazo de control *feed-back***

O diagrama de bloques correspondente ao intercambiador de calor amósase na figura 1.12.



T: Temperatura;  $T_m$ : Temperatura medida;  $S_p$ : *Set-point*; E: Erro;  $S_c$ : Saída do controlador;  $F_v$ : Caudal do vapor;  $T_0$ : Temperatura de entrada;  $q$ : Caudal da corrente a quente; G: Función de transferencia; m: Medidor; c: Controlador; v: Válvula; p,  $pp_1$ ,  $pp_2$ : Partes do proceso

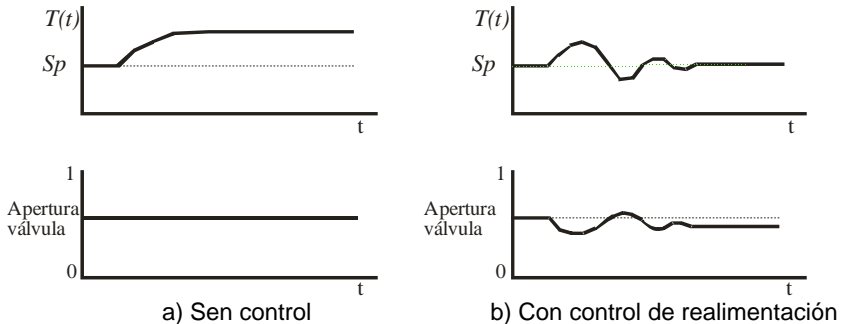
**Figura 1.12. Diagrama de bloques do intercambiador de calor**

## 5. Estratexias de control

### 5.1. Control de realimentación ou *feed-back*

Como xa se comentou, a estratexia de control do intercambiador de calor coñécese co nome de control de realimentación ou control *feed-back*. Nesta estratexia, a variable que se quere controlar é medida, e esa medición é a base do axuste de outra variable de proceso que pode ser manipulada [5]. É o sistema de control máis sinxelo, baséase no erro, é dicir na diferenza observada entre o valor medido da variable a controlar e o *set-point*, e soamente empeza a actuar cando aparece un erro no sistema.

Na figura 1.13 móstrase o comportamento dinámico do intercambiador de calor, sen e con sistema de control, cando se produce un incremento brusco na temperatura de entrada (perturbación-chanzo). Sen sistema de control, o aumento da temperatura de entrada tradúcese nun aumento da temperatura de saída. Co sistema de control de realimentación debidamente implementado, no instante no que a temperatura de saída do intercambiador empeza a aumentar debido á perturbación, o controlador detecta un erro (unha diferenza entre temperatura medida e temperatura desexada ou *set-point*) e segundo o algoritmo que teña definido, emitirá un sinal de saída (**P**roportional ao erro, á **I**ntegral do erro e á **D**erivada do erro) para pechar a válvula que manipula o caudal do vapor.



**Figura 1.13. Resposta do intercambiador de calor ante unha perturbación chanzo na temperatura de entrada: a) sen control b) con control de realimentación**

Ao diminuír o caudal do vapor que condensa, a temperatura de saída descende incluso por debaixo do punto de control, créase un erro de sentido contrario e menor valor que fai que o controlador dea instrucións á válvula para abrirse. Prodúcese así unha oscilación na temperatura de saída, consecuencia da oscilación na apertura da válvula, ata que finalmente o proceso se estabiliza. A operación do sistema de control de realimentación é esencialmente unha operación de ensaio e erro [1].

O control de realimentación<sup>1</sup> posúe unha serie de vantaxes que fan que, con moito, sexa a estratexia de control máis usada na industria do proceso:

1.- É unha técnica moi simple que compensa todas as perturbacións independentemente de cal sexa a súa orixe. Cando a variable controlada se desvía do valor desexado e aparece un erro, o controlador actúa para compensalo.

2.- Require coñecementos mínimos sobre o proceso a controlar.

3.- O controlador de realimentación é versátil e robusto, adáptase doadamente a novas condicións de operación.

Como desvantaxes hai que citar:

1.- Unicamente pode compensar a perturbación cando a variable controlada xa se desviou do *set-point*, isto é, a perturbación débese propagar por todo o proceso antes de que a poida compensar o control de realimentación.

2.- É necesario medir en liña a variable a controlar (ou unha variable directamente relacionada coa mesma).

3.- Este tipo de control non é eficaz para procesos lentos e/ou con grandes tempos mortos.

## 5.2. Control anticipativo ou *feed-forward*

Nos sistemas nos que a perturbación tarda moito en recorrer o proceso (dinámicas lentas, tempos mortos...), cando o erro aparece xa é difícil compensalo. Para eses procesos débense deseñar outros tipos de control. O obxectivo do control anticipativo ou *feed-forward* é medir as perturbacións e compensalas antes de que a variable controlada se desvíe do punto de control. Teoricamente con esta estratexia é posible o control ideal, onde a variable controlada non se desvía do punto de consigna.

No caso do intercambiador de calor, se polas condicións do proceso é habitual que a temperatura de entrada cambie frecuentemente, para anticiparse á devandita perturbación é necesario medir esa temperatura. No caso de ter un modelo axeitado para o proceso de intercambio, poderase determinar o troco necesario na apertura da válvula para compensar esa perturbación antes de que afecte á variable controlada ou temperatura de saída. Sen embargo, é imposible predicir e anticiparse a todas as posibles perturbacións dun proceso, por iso o sistema de control *feed-forward* nunca se atopa illado senón que sempre vai asociado a un *feed-back*. O sistema de control *feed-back/feed-forward* do intercambiador de calor móstrase na figura 1.14.

---

<sup>1</sup> O control de realimentación é habitual na vida diaria. É por exemplo a estratexia de control que utiliza a autora desta UD para manter o seu peso no valor de referencia desexado (55kg), peso que mide todas as noites na báscula da casa. A súa dieta habitual lévalle a manterse nese valor, sen embargo, se un día aparece unha perturbación (algunha celebración por exemplo) que fai que supere ese punto de referencia, ao detectar unha diferenza entre o peso medido e o *set-point*, decide pechar a válvula e non comer ao día seguinte para corrixir o erro.

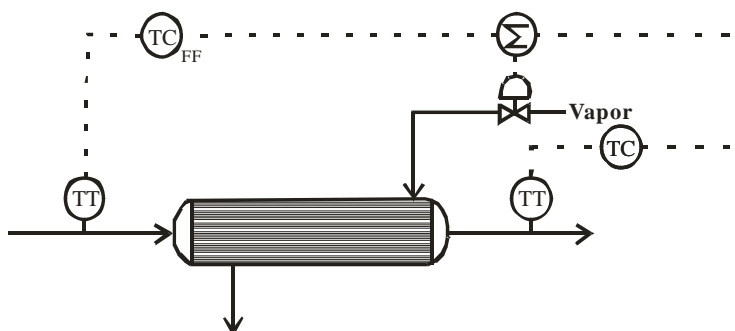


Figura 1.14. Sistema de control fed-back/feed-forward do intercambiador de calor

A principal vantaxe do sistema de control anticipativo<sup>2</sup> é:

1.- Acción anticipativa. Permite cancelar o efecto dunha perturbación antes de que esta se vexa reflectida na variable a controlar.

Como desvantaxes hai que citar:

- 1.- Maior custo que a estratexia de realimentación
- 2.- Necesidade de medición en liña da perturbación a compensar
- 3.- Necesidade dun modelo para o proceso
- 4.- Os controladores *feed-forward* ideais poden ser fisicamente irrealizables.

En xeral, esta estratexia de control e calquera outra máis avanzada que a de realimentación son máis custosas, requiren un maior investimento no equipo e na man de obra necesarios para o seu deseño, implementación e mantemento, que o control *feed-back*. Por iso, só se deseñan se economicamente está xustificado.

## 6. Niveis de control de procesos

A medida que o proceso industrial se volve máis complicado, o sistema de control do mesmo tamén se complica. Esta maior dificultade de deseño e implementación débese a que o número de variables de entrada e saída é superior, a que a relación entre as variables controladas e manipuladas é máis complicada e a que o número ou o grao de complexidade dos obxectivos do sistema de control é tamén superior [6].

<sup>2</sup> A autora desta UD ten unha debilidade, os pasteis. O control anticipativo do seu peso debe vixiar continuamente a entrada de pasteis, un ao día non desvía a variable a controlar dos 55kg. Sen embargo, se un día toma dous pasteis, antes de que a perturbación teña as súas consecuencias, a autora non ceará para evitar o aumento de peso. Deste xeito, Ana permanecerá sempre no peso desexado. Deberá aínda así manter o costume de pesarse polas noites xa que hai moitas outras perturbacións que non está vixiando, por exemplo os bombóns, e pode ser necesario nalgún caso aplicar tamén o control de realimentación.

A figura 1.15 representa unha columna de rectificación que é a máis común das operacións de separación industrial. Permite separar unha alimentación baseándose na diferenza de volatilidades dos seus compoñentes. Consta dun recipiente a presión onde un líquido se pon en contacto íntimo cun vapor (a través dunha serie de pratos ou mediante un leito de recheo), unha caldeira no fondo da columna que xera o vapor e un condensador na parte superior, que condensa total ou parcialmente o vapor que lle chega, proporcionando o líquido descendente (refluxo) e un destilado rico en compoñentes volátiles. Da parte inferior da columna extráese un produto de colas enriquecido nos compoñentes menos volátiles.

Nesta unidade e por cuestións de seguridade será necesario controlar a presión. Tamén por seguridade e para manter a produción será necesario controlar os niveis de líquido no tanque de refluxo e no fondo da columna. Por último, haberá que controlar as composicións (calidade) do destilado e do produto de colas. Calquera caudal pode ser en principio manipulable: alimentación, destilado, produto de colas, refluxo, vapor de calefacción ou caudal de auga de refrixeración no condensador. Ademais existen numerosas variables que se sofren pequenas variacións, habituais en calquera proceso, farán que as variables controladas saian do seu valor de réxime, facendo que se perda a produción ou incluso desestabilizando o proceso ou levando a problemas de seguridade. Poden ser variables perturbación: o caudal, a composición e a temperatura da alimentación, a presión de suministro do vapor calefactor, a temperatura da auga de refrixeración...

A relación entre variables manipuladas e controladas é complicada e poden existir grandes interaccións entre os lazos que se deseñen. Por exemplo, se se desexa controlar o nivel do fondo da columna manipulando o vapor de calefacción, ao mesmo tempo producírase un aumento da presión, un aumento no nivel do tanque de refluxo, un troco nas calidades dos produtos...

O obxectivo do sistema de control da columna de rectificación pode ser simplemente a consecución dunha operación estable (sen problemas de inundación ou goteo, sen que se produza a superación da capacidade de condensación do condensador, etc.) e segura da columna. Isto pode acadarse mediante un sistema de control básico formado por lazos de realimentación. Obxectivos que apunten ao máximo beneficio económico ou mínimo custo de operación, implican o uso de estratexias de control máis avanzadas e por tanto máis custosas e de maior dificultade de implementación.

O nivel de automatización dunha planta de proceso pode limitarse a un **control regulatorio básico** ou polo contrario acadar unha **optimización en liña**, pasando por un **control regulatorio avanzado** e un **control multivariable** [6]. Como é habitual na Enxeñaría Química, a elección responde a unha solución de compromiso entre necesidades e disponibilidades.

## 6.1. Control básico

O control básico, baseado en controladores de realimentación, aspira a ter unha operación estable mantendo en determinado valor as variables máis importantes do proceso (presións, niveis, caudais, temperaturas...). A Figura 1.15 amosa o control básico dunha columna de destilación.

A presión na columna contrólase mediante un lazo de realimentación ou *feed-back* que manipula o caudal de auga de refrixeración no condensador. O caudal de alimentación contrólase mediante un lazo *feed-back*. Ambas, variable controlada e manipulada son o caudal de alimentación. Segundo o valor medido do caudal, o controlador mandará un sinal á válvula que se abrirá ou pechará para axustar devandito caudal ao punto de consigna. Os lazos de control de nivel na cámara do condensado e no fondo da columna manipulan os caudais de destilado e produto de colas, respectivamente.

Existen dous lazos de temperatura para controlar indirectamente a calidade dos produtos. O equilibrio líquido-vapor da mestura a destilar establece unha relación entre composicións e temperaturas. A temperatura nun prato situado na parte superior da columna (e por tanto dalgunha maneira a composición de destilado), é controlada manipulando o caudal de refluxo. A temperatura nun prato no fondo da columna (composición do produto de colas) é controlada manipulando o vapor de calefacción.

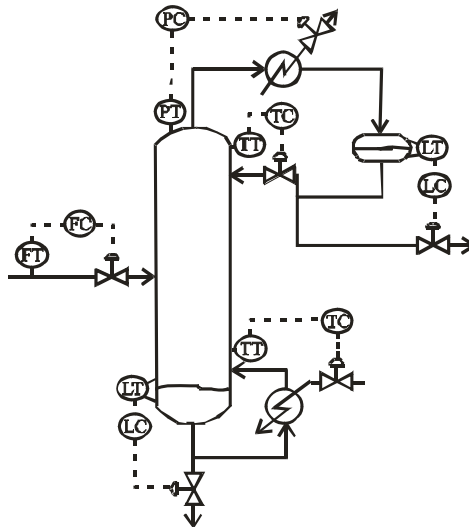


Figura 1.15. Control básico dunha columna de destilación

Este sistema de control básico posúe varias limitacións que farán que a operación sexa estable pero lonxe do óptimo económico. A primeira delas radica na utilización da temperatura como medida indirecta da composición. Esta relación complicase en mesturas azeotrópicas, multicomponentes... e en calquera caso é unha medida pouco precisa da calidade dos produtos. Outra limitación é inherente aos lazos *feed-back*,

dato que só comezan a controlar o sistema cando xa apareceu un erro no mesmo. Posto que unha columna de destilación é un proceso de dinámica lenta, o control é menos efectivo.

Ademais, xa se comentou a gran interacción entre as variables do proceso que se traduce nunha gran interacción entre os lazos de control implementados. Se o controlador da temperatura no fondo da columna manda abrir a válvula do vapor de calefacción, isto afecta de inmediato ao lazo de control do nivel no fondo da columna, sen embargo tamén afecta aos lazos de control da temperatura na parte superior, da presión e do nivel da cámara de condensación...Esta interacción entre lazos deberá terse en conta á hora de facer o axuste dos controladores ao proceso.

Debido a todas estas limitacións, as variables controladas sufrirán amplas oscilacións. Como é necesario cumprir cos requisitos de produción en todo momento, será necesario marcar uns puntos de consigna moi por encima das especificacións desexadas, de tal forma que, a pesar das oscilacións, a columna opere sempre dentro de especificacións. Isto tradúcese nun maior consumo enerxético (vapor de calefacción) e polo tanto nun maior custo de operación.

Todas estas desvantaxes son comúns a calquera sistema de control básico da columna, outros exemplos deste nivel de automatización amósanse na figura 1.16. Entre as diferentes alternativas, o mellor sistema de medida da calidade é obviamente o que usa analizadores. Sen embargo, o uso destes instrumentos para o seu traballo en liña implica unha serie de problemas: dificultade de encontrar o medidor de composición axeitado para a mestura a destilar, a lentitude da medida, o custo de investimentos e de mantemento...Por todo isto, segue sendo habitual traballar coa temperatura como medida indirecta da composición.

Non existe un único sistema de control válido para calquera columna de destilación, a opción máis axeitada dependerá das características do proceso e só poderá ser elixida de acordo a un estudo dinámico da columna. En calquera caso, todos os controis básicos limitanse unicamente á consecución dun proceso estable.

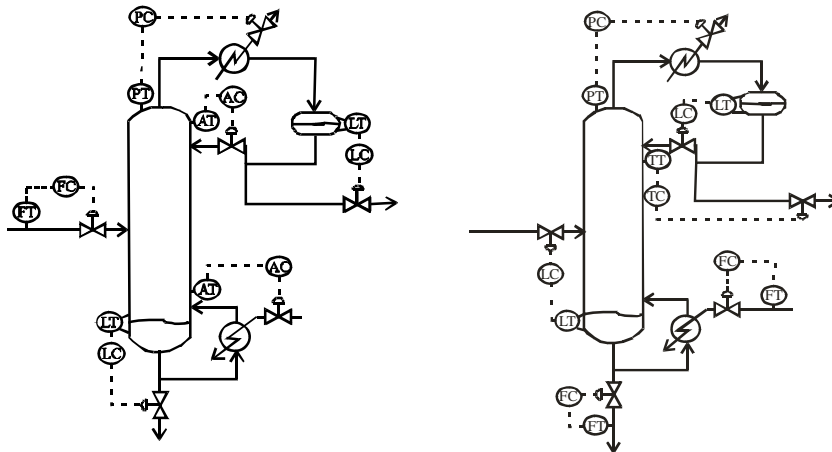


Figura 1.16. Outros sistemas de control básico para unha columna de destilación

## 6.2. Control avanzado

Co obxectivo principal de manter unha operación estable, introducindo lazos avanzados de control pódese mellorar o obxectivo económico.

Dentro dos lazos avanzados máis habituais aparece o **sistema de control en cascada**. A saída dun controlador principal ou *master* marca o *set-point* dun controlador secundario ou *slave*. A principal vantaxe deste lazo avanzado é que compensa perturbacións relacionadas coa variable manipulada antes de que afecten á variable controlada principal (lazo primario). Outros lazos avanzados que aparecen neste nivel de control son os anticipativos. Como xa se indicou, o control *feed-forward* é capaz de anticiparse a unha perturbación de carga concreta. Dentro desta estratexia de control é habitual o control de relación, ou *ratio*, que se usa para manter a relación entre dous caudais constante.

Un sistema de control avanzado para a columna de destilación amósase na figura 1.17. Consta de dous sistemas de control en cascada. O controlador principal do nivel no fondo da columna fixa o *set-point* dun controlador secundario de caudal de produto de colas. Deste xeito, calquera perturbación relacionada con este caudal é compensada no lazo secundario antes de que afecte ao nivel. De maneira idéntica funciona o controlador do nivel na cámara de condensación que fixa o *set-point* dun controlador do caudal de destilado.

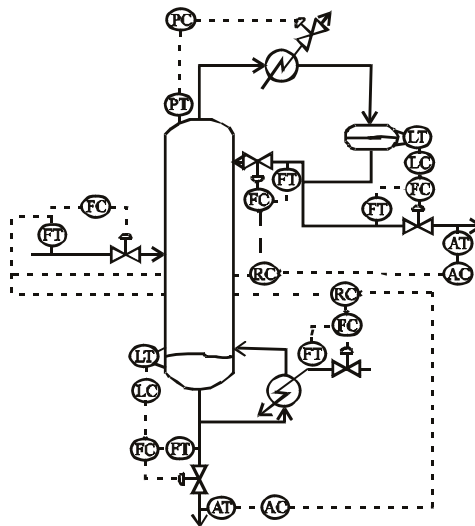


Figura 1.17. Control avanzado dunha columna de destilación

No sistema de control avanzado da figura 1.17, o controlador da composición do produto de colas manda un sinal a un controlador de relación (anticipativo) que, segundo sexa esta, fixa unha relación constante

entre o caudal de alimentación e o vapor de calefacción. Este controlador recibe a información do valor do caudal de alimentación e, a partir desta, fixa o *set-point* do controlador de caudal do vapor de calefacción. De maneira similar, o controlador da composición de destilado fixa a relación entre o caudal de alimentación e o reflujo.

Neste sistema de control avanzado utilízanse analizadores de composición e lazos de control que compensan perturbacións antes de que afecten ás variables controladas principais, permitindo así unha aproximación ao control ideal. As desviacións das variables controladas dos seus puntos de consigna durante todo o proceso de control serán inferiores ás existentes cun sistema de control básico, polo tanto, os puntos de consigna poden definirse próximos ás especificacións desexadas. Mellórase o obxectivo económico a base dun maior custo de investimentos e mantemento.

### 6.3. Control multivariable

Os lazos de control instalados na columna de rectificación presentan interaccións entre eles. Como xa se viu, se a temperatura no fondo da columna é moi baixa, o controlador mandará abrir a válvula do vapor de calefacción para volatilizar os compostos máis volátiles e que así a temperatura aumente. Deste xeito, o nivel no fondo da columna vai diminuír, a presión aumentará, o nivel na cámara de condensación aumentará... Queda claro por tanto que unha variable manipulada afecta a varias variables controladas do proceso, calquera acción correctora que se tome sobre unha variable manipulada perturbará as demais variables controladas. Aínda que existen técnicas para obter o mellor emparellamento de variables para desacoplar a interacción entre lazos (Matriz de Ganancias Relativas, RGA), o control automático da columna mediante lazos básicos, ou incluso avanzados, de control, é moi complexo debido á presenza de tempos mortos, interaccións e restricións.

A diferenza do intercambiador de calor que posuía unha soa entrada e unha soa saída (SISO, *Single Input Single Output*), a columna de rectificación e outras moitas unidades da industria química posúen múltiples entradas e múltiples saídas (MIMO, *Multiple Input Multiple Output*). Un sistema de control multivariable (por exemplo o Control Preditivo Basado en Modelos, CPBM) ante unha desviación nunha variable controlada actúa simultaneamente sobre todas as variables manipuladas, de forma que as restantes variables controladas non se vexan afectadas ou o sexan minimamente.

A dificultade deste sistema de control consiste na necesidade dun modelo matricial do proceso que relacione todas as variables de saída a controlar con todas as variables de entrada manipulables, e na implementación do mesmo.

#### 6.4. Optimización *on-line*

A optimización dun proceso consiste na determinación das condicións de operación coas que se obtén o máximo beneficio económico ou, no seu caso, o menor custo posible. As condicións óptimas de operación trocan continuamente debido a trocos nas materias primas, a cantidade ou calidade do produto demandado, os prezos dos materiais e produtos... Un sistema de optimización en liña dispón dunha función obxectivo que optimiza (maximiza se é beneficio, minimiza se é custo), e segundo os valores óptimos calculados para as variables fixa os *set-points* dos controladores a obxecto de que o proceso estea continuamente operando en condicións óptimas.

A dificultade deste sistema de control, hoxe en día en desenvolvemento, radica na combinación dun modelo matemático complexo coas complicacións propias dun problema de optimización multivariable.

#### 7. Deseño do sistema de control

O coñecemento da planta é un requisito indispensable para a correcta implementación dun sistema de control, de feito, o deseño do proceso e do seu sistema de control deben ser simultáneos.

A primeira etapa debe ser a análise dinámica do proceso. Permitirá a selección de variables manipuladas axeitadas e o estudo da influencia destas, e das posibles perturbacións, sobre as variables a controlar. Deste estudo pode inferirse a necesidade de introducir unidades non consideradas inicialmente no deseño estacionario, como pode ser un tanque pulmón que homoxeneice o caudal. Identifícaranse nesta etapa as variables a medir (variables controladas e posibles perturbacións a introducir en lazos avanzados) e as variables manipuladas, que se combinarán en diferentes lazos atendendo aos obxectivos (control básico ou optimización do proceso).

A seguinte etapa é a especificación da instrumentación para o control. Cómpre seleccionar os sensores para a monitorización e o control, para o cal é necesario considerar as súas aplicacións, rapidez, custo, mantemento, facilidade do suministro, etc. Será necesario tamén especificar e participar na xestión de adquisición de válvulas e controladores, así como dos medios de comunicación entre eles, para montar os lazos.

Unha vez implementados os lazos de control, cómpre dar as instrucións necesarias aos controladores para que estes respondan de maneira axeitada ante as perturbacións, é dicir, é necesario facer o axuste dos controladores ao proceso. Este axuste pódese facer de maneira completamente empírica (forzando perturbacións no proceso real, cos problemas de desestabilización que iso implica), ou mediante modelización, para o que é necesario dominar as ferramentas propias da Enxeñaría Química (balances).

A última etapa implica a análise dinámica do proceso xunto cos instrumentos seleccionados para a automatización e permitirá demostrar a eficacia do sistema de control proposto.

## **ACTIVIDADES PROPOSTAS**

---

- Lazos de realimentación. Presentaranse ao alumnado diferentes exemplos de lazos de control *feed-back*. Os estudantes deben, traballando en grupo, identificar as variables e instrumentos implicados no sistema de control e representar os correspondentes diagramas de bloques.
- Diagramas P&I. Presentaranse ao alumnado diferentes diagramas P&I, tanto de unidades como de plantas completas, con lazos básicos e algún avanzado, para a explicación do seu sistema de control. As actividades resolveranse en grupos reducidos.

## **AVALIACIÓN DA UNIDADE DIDÁCTICA**

---

Para a avaliación desta UD, e como parte dunha avaliación continua da materia, o alumnado explicará individualmente o diagrama P&I dunha planta química sinxela.

A proba realizarase xusto ao finalizar a UD e consistirá exactamente na mesma actividade realizada nas clases interactivas cos diagramas P&I, só que esta vez o alumnado debe realizar o traballo individualmente. Á vista do diagrama, deberá identificar as principais variables implicadas no control, identificar os tipos de lazos de control e explicar o seu funcionamento.

## BIBLIOGRAFÍA

---

- [1] SMITH, Carlos A. y CORRIPIO, Armando B. (2001): *Control Automático de Procesos. Teoría y Práctica*, México: Limusa.
- [2] MÉNDEZ, Francisco y CORRALES, José: «Manual de Control de Procesos I. Fundamentos de Control», *Ingeniería Química* 461 (2008) 76-83.
- [3] ANGULO BAHÓN, Cecilio y RAYA GINER, Cristóbal (2004): *Tecnología de Sistemas de Control*, Barcelona: Ed. UPC.
- [4] VALDMAN, Belkys (1999): *Dinâmica e Controle de Processos*, Santiago: Tórculo.
- [5] SEBORG, Dale E., MELLICHAMP, Duncan A., EDGAR, Thomas F. y DOYLE, Francis J. (2011): *Process Dynamics and Control*, New York: 3ª Ed., J. Wiley & Sons.
- [6] OLLERO DE CASTRO, Pedro y FERNÁNDEZ CAMACHO, Eduardo (1997): *Control e Instrumentación de Procesos Químicos*, Madrid: Síntesis.





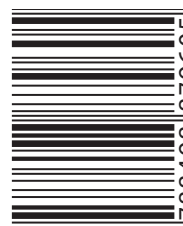
Unha colección orientada a editar materiais docentes de calidade e pensada para apoiar o traballo do profesorado e do alumnado de todas as materias e titulacións da universidade



Impreso en papel 100% reciclado e libre de cloro



SERVIZO DE NORMALIZACIÓN  
LINGÜÍSTICA



9 788498 879605