

TEMA 5 – INTRODUCCIÓN AL CONTROL DE OPERACIONES BÁSICAS

5.1. DEFINICIÓN DE LOS GRADOS DE LIBERTAD	2
5.2. CÁLCULO DE LOS GL DE UNA UNIDAD DE PROCESO	3
5.3. GRADOS DE LIBERTAD DE UN PROCESO.....	7
5.3.1. Expresión alternativa cuando existe intercambio de energía térmica.....	10
5.4. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE ESTRATEGIAS DE CONTROL.....	11
5.4.1. Establecimiento del número de grados de libertad para el control (Paso 1).....	11
5.4.2. Identificación de las variables controladas y manipuladas, restricciones y perturbaciones (Paso 2).....	12
5.4.3. Preasignación de estrategias (Paso 3)	13
5.4.4. Análisis de las ganancias en condiciones estacionarias (Paso 4).....	13
5.4.5. Análisis de sensibilidad o robustez (Paso 5).....	15
5.4.6. Análisis de interacciones (Paso 6)	15
5.4.7. Estudio del comportamiento dinámico del sistema (Paso 7).....	18
5.5. NOTACIÓN DEL CAPÍTULO.....	19
5.6. REFERENCIAS	19

Tema 5 – INTRODUCCIÓN AL CONTROL DE OPERACIONES BÁSICAS

El presente capítulo expone una metodología de trabajo para determinar las mejores alternativas entre las estrategias de control posibles para las distintas operaciones básicas o reactores que constituyen un proceso. El procedimiento describe especialmente las pautas recomendadas para el análisis de cada caso. La definición de las estrategias de control, entendiendo como tales el emparejamiento de cada variable controlada (CV) con la/s adecuada/s variable/s manipulada/s (MV's), constituye el principio básico en la definición del sistema de control de una planta de proceso.

El control se establece jerárquicamente, comenzando por el control de cada variable para, posteriormente, analizar el control del conjunto de variables que intervienen en las mencionadas operaciones básicas o reactores. Por último se analizarán las influencias de las estrategias de las distintas operaciones y reactores que, en su conjunto, constituyen un proceso.

La metodología propuesta se basa en dos principios básicos que se aplican a todos los casos: 1) Es necesario el análisis del funcionamiento de cada lazo desde una óptica de proceso, partiendo del conocimiento de las relaciones (de balance, físico-químicas o de diseño) existentes entre las distintas variables involucradas en cada circunstancia 2) No es posible tipificar las estrategias, es decir, establecer recetas o comportamientos genéricos, por lo que el análisis debe ser específico para cada caso concreto.

Un sistema de control se construye partiendo de las estructuras más sencillas, en lo que constituye el llamado control básico o regulatorio, para ir posteriormente incorporando elementos o módulos más complejos del denominado control avanzado. El control básico se constituye esencialmente en base a lazos de control realimentados de una sola entrada (la medida de la CV) y una sola salida (la orden a la MV), los denominados lazos SISO, complementados con indicadores para ciertas variables que simplemente han de monitorizarse aunque no se controlen. La decisión de qué variable manipular con cada variable que se quiere controlar será el objetivo fundamental de la metodología que se comenta a continuación y que se aplicará a las distintas operaciones y reactores en capítulos sucesivos.

Hasta aquí se ha mencionado el control de operaciones y reactores, sin embargo no debe olvidarse que el verdadero objetivo es el control del conjunto del proceso. Ello obligará no sólo a tener en cuenta el control de cada operación o reactor sino también el del conjunto, analizando las posibles interferencias entre unas operaciones y otras y el efecto de los ciclos. Este planteamiento global se suele denominar control de planta y se abordará en las distintas aplicaciones prácticas que complementan el desarrollo teórico de este curso.

La aplicación de la metodología arranca con la necesidad de conocer el número de grados de libertad para control existente en una operación básica o proceso determinados. Por ello se plantea inicialmente un método de cálculo de dichos grados de libertad.

ANÁLISIS DE LOS GRADOS DE LIBERTAD DE UN PROCESO

5.1. Definición de los grados de libertad

Existen varios procedimientos para definir el número de grados de libertad para control, desde los más elementales como el establecer el número de corrientes en las que es posible instalar válvulas de control, es decir identificación de las variables manipulables y asumir que ese será el máximo de variables controlables o el método de J.W.Ponton [Ref.5. 1]. Ambos métodos pueden presentar dificultades de aplicación en ciertos casos por lo que se ha optado en este texto por el desarrollo de un método riguroso basado en las ecuaciones del sistema (balances dinámicos, ecuaciones de equilibrio, etc.).

Antes de determinar las variables manipuladas y controladas es conveniente realizar un análisis de los grados de libertad del proceso. Este análisis determinará los grados de libertad relacionados con la operación de la planta y no con el diseño. Los parámetros de diseño como tamaños de los equipos, número de tubos de un cambiador, etc., se suponen ya previamente fijados.

Los grados de libertad (GL) se definen de forma genérica como:

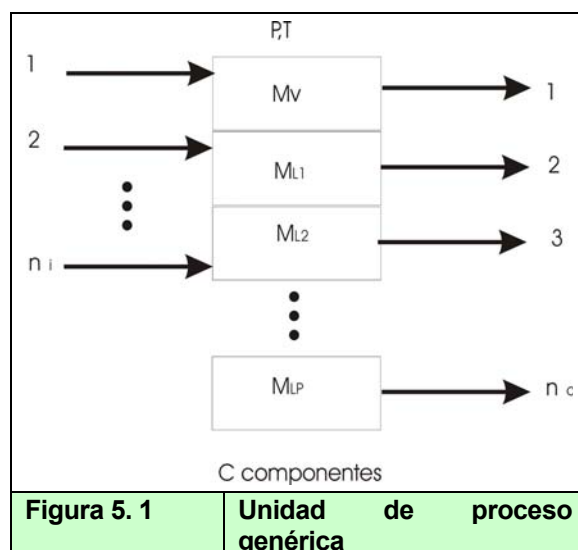
$$GL = \text{Número de Variables del sistema} - \text{Número de Ecuaciones del Sistema}$$

Los grados de libertad serán las variables que es necesario fijar de algún modo para que el sistema esté completamente determinado, y por tanto tenga solución única. Los GL podrán venir fijados externamente: perturbaciones al sistema, o internamente: mediante el sistema de control y la optimización.

Para realizar el análisis se pueden formular todas las ecuaciones del proceso, contar las variables y ver el resultado, sin embargo, repetir este procedimiento en cada caso puede ser tedioso y propenso a que se cometan errores. A continuación se detalla un método, basado en el citado método de Ponton, para determinar los grados de libertad de un sistema de forma sencilla y de aplicación genérica.

5.2. Cálculo de los GL de una unidad de proceso

Sea una unidad a una cierta presión, **P**, temperatura, **T**, con **ni** corrientes de entrada, **nc** de salida con **C** componentes en total y un cierto número de fases **NF**, como en el esquema de la figura



Variables del sistema (unidad + corrientes)

- Variables de las corrientes de entrada.

Cada corriente tiene C variables, una por caudal de cada componente, más una presión y una temperatura, luego $C+2$. Si entran n_i corrientes el número total de variables de las corrientes de entrada será $n_i \cdot (C+2)$

- Variables de la unidad

Con equilibrio

La Presión y la Temperatura serán comunes a todas las fases por estar en equilibrio. El número de variables por acumulación de materia en cada fase será igual al número de fases por el número de componentes en cada fase, es decir, $NF \cdot C$

$$\text{Total de variables de la unidad : } NF \cdot C + P + T = \mathbf{NF \cdot C + 2}$$

Sin equilibrio

En este caso tendremos tantas temperaturas y presiones como fases, es decir $NF + NF$. En total el número de variables:

$$\text{Total de variables de la unidad : } NF \cdot C + NF + NF = \mathbf{NF \cdot (C + 2)}$$

- Variables de las corrientes de salida

Para cada corriente de salida se tendrán $C + 2$ variables, una por componente más la presión y la temperatura. La presión, la temperatura y las composiciones de todas las corrientes ya están contabilizadas anteriormente (en las variables de la unidad). Queda por tanto únicamente la cantidad total que sale de cada corriente. Por tanto si salen **no** corrientes el número total de variables nuevas será **no**.

	Con equilibrio	Sin equilibrio
Nº total de variables del sistema:	$ni \cdot (C + 2) + NF \cdot C + 2 + no$	$ni \cdot (C + 2) + NF \cdot (C + 2) + no$

Ecuaciones del sistema

Se supone en este primer análisis que cada fase sólo tiene una corriente de salida.

- Balances de materia

Se pueden establecer tantos balances de materia como componentes participen en la unidad, luego ecuaciones derivadas de estos balances: **C**

- Balances de energía

Sólo se puede establecer un balance de energía por unidad, luego el número de ecuaciones será **1**

- Balances de momento

Sólo se puede establecer un balance de momento (aunque es un balance vectorial se considera sólo un balance en la línea de flujo, normalmente un balance axial)

- Relaciones de equilibrio o ecuaciones de transporte

Por cada interfase se pueden establecer tantas relaciones de equilibrio o ecuaciones de transporte como componentes participen en el mismo. El número de interfases será el número de fases menos uno, es decir $NF - 1$.

Con equilibrio

El número de ecuaciones de equilibrio teniendo C componentes será pues: $(NF-1)*C$

Sin equilibrio

El número de ecuaciones de transporte de materia: $(NF-1)*C$

El número de ecuaciones de transporte de energía: $NF-1$

El número de ecuaciones de transporte de momento: $NF-1$

El número total de ecuaciones: $(NF-1)*(C+2)$

En el caso de existir la fase vapor existe una ecuación adicional y es la ecuación de estado $f(P, V, n^o \text{ de moles}, T)$. También aparece una variable adicional, V. Con lo cual el número de ecuaciones queda:

Nº total de ecuaciones del sistema:	Con equilibrio	Sin equilibrio
Con fase vapor:	$C + 1 + 1 + (NF-1).C + 1$	$C + 1 + 1 + (NF-1)*(C+2) + 1$
Sin fase vapor:	$C + 1 + 1 + (NF-1).C$	$C + 1 + 1 + (NF-1)*(C+2)$

El número de variables queda:

Nº total de variables del sistema:	Con equilibrio	Sin equilibrio
Con fase vapor:	$ni.(C+2) + NF*C+2 + no+1$	$ni.(C+2) + NF*(C+2) + no+1$
Sin fase vapor:	$ni.(C+2) + NF*C+2 + no$	$ni.(C+2) + NF*(C+2) + no$

Análisis de los grados de libertad

Como se ha dicho $GL = N^o \text{ Variables} - N^o \text{ Ecuaciones}$

Con equilibrio

Sin fase vapor

$$GL = ni.(C+2) + NF*C+2 + no - (C+1+1+(NF-1).C)$$

Con la suposición de que existe una sola salida por fase se tendrá que $no = \text{Número de fases}$, es decir a NF, luego:

$$GL = ni.(C+2) + NF*C + 2 + NF - C - 1 - 1 - NF.C + C = ni.(C+2) + NF$$

o bien

$$= ni(C+2) + no$$

Sin equilibrio

Sin fase vapor

$$GL = n_i.(C+2) + NF*(C+2) + n_o - [C + 1 + 1 + (NF-1)*(C+2)] = n_i*(C+2) + n_o$$

Igual resultado se obtiene con fase vapor ya que aumenta en una unidad tanto las variables como las ecuaciones.

Para completar este análisis es necesario tener en cuenta también los posibles flujos de energía, ya sea térmica, o mecánica (de corrientes o equipos auxiliares) a la unidad, éstos (sea el número de intercambios que sea con una única unidad) aportan un grado de libertad (ya que aportan únicamente una variable, su energía que será térmica o mecánica y aparecerá en el balance correspondiente).

En el caso de que exista más de una corriente de salida por fase, cada corriente extra añade un grado de libertad al sistema que será su caudal dado que la composición, presión y temperatura deben ser las mismas que las de la corriente principal. Siendo E el número total de corrientes extras, las expresiones de los grados de libertad quedarán:

	Con flujo energía	Sin flujo de energía
GL	$n_i.(C+2) + 1 + n_o + E$	$n_i.(C+2) + n_o + E$

Pero todavía queda hacer ciertas consideraciones adicionales:

De estos grados de libertad de las corrientes de entrada sólo se puede fijar mediante el control un grado de libertad por corriente, su caudal, ya que el resto tienen que venir definidos externamente y por tanto desde la óptica de la unidad no serán GL sino perturbaciones. El número de grados de libertad para control que quedan de las corrientes de entrada es por tanto n_i .

Con esta consideración los grados de libertad que quedan coinciden con los del caso en que existe vapor y la tabla anterior se resume en:

Grados libertad	Con flujo energía	Sin flujo de energía
	$n_i + 1 + n_o + E$	$n_i + n_o + E$

Como se observa, el número de grados de libertad coincide con el número de corrientes de materia más la de energía en caso de existir intercambio en la unidad, aunque debe hacerse una última consideración. Los grados de libertad así definidos incluyen los términos dinámicos de acumulación en las fases pero hay casos en los que esta acumulación no existe o bien está definida implícitamente. Como ejemplo del primer caso sería una separación de corrientes y como ejemplo del segundo caso un tanque que descarga por reboso. En estas circunstancias se deben descontar tantos grados de libertad como acumulaciones no se consideren o no sean posibles. Ha de advertirse que si la acumulación se considera de alguna forma, aunque sea indirecta, no se debe restar ningún grado de libertad. Por ejemplo si no se controla el nivel pero se controlan TODOS los caudales de salida tampoco se debe restar ningún grado de libertad.

Las anteriores reflexiones pueden incorporarse a la expresión que da el número de GL con las siguientes definiciones.

Sea H una variable que toma el valor 1 si hay intercambio de energía con el exterior y 0 si no lo hay. Si el intercambio existente es entre corrientes del proceso cuyos grados de libertad se están considerando, su valor será igualmente 0.

Sea A el número de acumulaciones (inventarios) **de cualquier fase** que no se quieren contabilizar. Si sólo existe fase líquida, sólo se considerará la potencial acumulación de líquido. Si sólo hay fase gas

sólo se considerará la posible acumulación de presión. Si el mantenimiento de los respectivos inventarios de cualesquiera de ellas no requiere la utilización de variable alguna del proceso, se dará la misma consideración que si estuviesen insatisfechos, es decir, se restará un grado de libertad asignando al término A una unidad por cada uno de esos inventarios teóricamente insatisfechos. Dicho de otra forma, A elimina un GLC si existe una variable de proceso disponible para controlar el inventario que no se usa porque no se desea o porque no se puede.

El número de grados de libertad para cada unidad queda:

$$\text{Grados de libertad} = n_i + H + n_o + E - A$$

Denominando $n_o + E = \text{not}$, número total de salidas de la unidad, se llega a la fórmula final:

$$\text{Grados de libertad} = n_i + \text{not} + H - A$$

En el caso de existir reacción el número de grados de libertad es el mismo pues aunque aparece una nueva incógnita por reacción, está relacionada mediante una ecuación con variables ya contabilizadas con lo cual añade una variable y una ecuación por reacción y por tanto no afecta a los grados de libertad.

5.3. Grados de libertad de un proceso.

El análisis previo se refiere a una unidad, en el caso de tener un proceso los grados de libertad totales serán la suma de los grados de libertad de todas las unidades pero sin contabilizar las entradas (dado que cualquier entrada es salida de otra unidad) más el número de corrientes entrantes al proceso.

Para un proceso con **NU** unidades y **nip** entradas al proceso se tendrá:

$$\text{Grados de libertad} = \text{nip} + \sum_{(u=1)}^{\text{NU}} (\text{no}_u + H_u - A_u)$$

Los GL así determinados será el número de variables que se deben controlar para tener el sistema correctamente especificado. Esto equivale al número de bucles SISO que se pueden establecer como **número máximo**, pero pueden existir restricciones por razones de proceso que hagan que el número real sea inferior a este, por ejemplo en el caso de la destilación. A continuación se desarrollan algunos ejemplos de aplicación de estos cálculos

Grados de libertad de cambiadores

➤ Intercambio entre corrientes líquidas de proceso, sin acumulación en carcasa (o con acumulación – nivel- que no interesa controlar):

$$\text{GL} = \text{nip} (=2) + \text{not} (=2) - A (=2) + H (=0) = 2$$

Analizado como un proceso con dos equipos: el lado carcasa y el lado tubos, resulta más claro el planteamiento:

$$\text{Lado tubos: not} (=1) - A (=1) + H (=0) = 0$$

$$\text{Lado carcasa: not} (=1) - A (=1) + H (=0) = 0$$

A, número de inventarios insatisfechos, vale la unidad porque el nivel de líquido no utiliza ninguna variable para su control (aunque en realidad está automáticamente controlado al estar el tubo lleno de líquido por disposición geométrica) por lo que se resta un grado de libertad. Al no existir fase gas el inventario de éste no existe y la presión no influye. H es cero porque no hay intercambio con el exterior (el intercambio es con una corriente del mismo proceso).

En conjunto, como se había formulado:

$$GL \text{ cambiador completo} = nip + 0 + 0 = 2 + 0 + 0 = 2$$

➤ Intercambio entre corriente de proceso y auxiliar, sin acumulación en carcasa (o con acumulación – nivel- que no interesa controlar):

$$GL = nip(=1) + not(=1) - A(=1) + H(=1) = 2$$

En este caso solo se considera el lado de proceso, por lo que el intercambio de calor es con el exterior y por tanto $H = 1$

A vale la unidad por las mismas razones comentadas para el caso anterior para el lado proceso.

Grados de libertad de bombas

$$GL = nip(=1) + not(=1) - A(=1) + H(=1) = 2$$

La presión no se debe considerar como variable de inventario al existir únicamente fase líquida. Como el nivel no se controla, A vale la unidad (aunque el nivel está obligatoriamente garantizado por la disposición geométrica, su control no utiliza ninguna variable por lo que se pierde un grado de libertad). EL término H toma el valor de la unidad ya que existe un aporte de energía mecánica.

Grados de libertad de vaporizador (sin salida de la fase líquida)

$$GL = nip(=1) + not(=1) - A(=0) + H(=1) = 3$$

Grados de libertad de CSTR calefactado, 2 entradas y una salida líquida

$$GL = nip(=2) + not(=1) - A(=0) + H(=1) = 4$$

Grados de libertad de una destilación

➤ Columna

$$nip(=1) + not(=2) - A(=2) + H(=0) = 1$$

➤ Rehervidor

$$nip(=1) + not(=2) - A(=1) + H(=1) = 3 \text{ (en este caso no se controla la presión)}$$

➤ Condensador

$$nip(=1) + not(=2) - A(=0) + H(=1) = 4$$

Dado que la destilación es como un proceso, se aplica la fórmula para el mismo y para no contabilizar doblemente las corrientes de entrada.

$$GL \text{ conjunto} = n_{ip} + 3^{NU}_{(u=1)} (n_{o_u} + H_u - A_u)$$

$$GL = 1 + [2-2+0] + [2-1+1] + [2-0+1] = 6$$

Grados de libertad de una absorción (con intercambiador) sin recirculación

$$GL = n_{ip}(=2) + n_{ot}(=2) - A(=0) + H(=1) = 5$$

GL en un Horno de proceso:

Lado de proceso:

$$N_{ot}(=1) - A(=1) + H(=0) = 0$$

El inventario de presión no se tiene en cuenta por considerar sólo fase líquida en los tubos. El inventario líquido no se controla externamente. H es 0 porque el intercambio térmico es sólo con corrientes internas, es decir, con el exterior no existe. Si se considerase que la salida de proceso es bifásica, como seguiría sin controlarse ni el nivel ni la presión habría que restar 2 grados de libertad, pero habría que considerar dos corrientes de salida (una por fase), en resumen quedaría

$$N_{ot}(=2) - A(=2) + H(=0) = 0 \quad \text{es decir, el mismo resultado que con una sólo fase.}$$

Lado hogar:

$$N_{ot}(=1) - A(=0) + H(=0) = 1$$

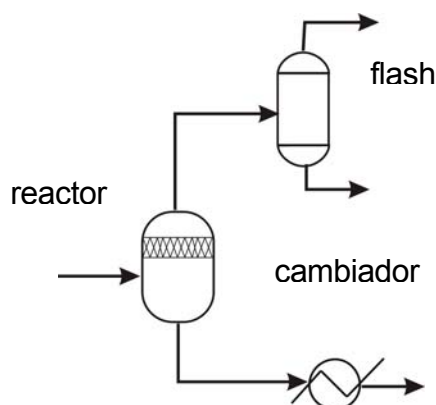
A es 0 porque la presión sí se controla pero el nivel no se considera al ser sólo fase gas. H = 0 por las mismas razones anteriores.

En conjunto:

$$N_{ip}(=3) + 0 + 1 = 4$$

Cálculo de los GL de un proceso más complejo

Sea un proceso formado por un reactor, un flash y un cambiador de calor según el esquema adjunto. El cálculo de los GL daría:



nip=1

Reactor: $\text{not}(=2) - A(0) + H(=0) \rightarrow 2$

Flash: $\text{not}(=2) - A(0) + H(=0) \rightarrow 2$

Cambiador: $\text{not}(=1) - A(1) + H(=1) \rightarrow 1$

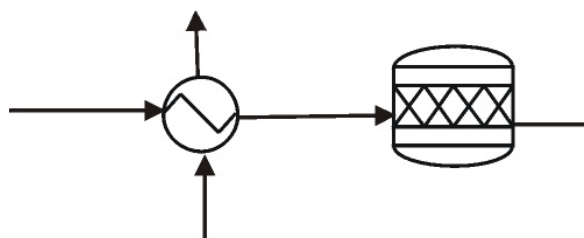
GL Proceso: $1+2+2+1=$ **6 grados de libertad**

En este ejemplo las posibles CV's serían: caudal de entrada, nivel del reactor, presión del reactor, temperatura tras el cambiador, nivel del flash y presión del flash.

Al no controlarse el nivel en el cambiador el número de grados de libertad es menor que el número de válvulas disponibles, 6 válvulas en las corrientes de proceso y 1 en la corriente auxiliar.

El siguiente paso será decidir cuáles de todas las variables se puede/quiere controlar, qué variables podemos medir y qué variables podemos manipular. Nótese que las variables manipuladas deberían coincidir con las corrientes disponibles y en caso de no hacerlo, si fuese por no contabilizar algún inventario implicaría que una de las corrientes de proceso (materia) involucradas debe quedar sin válvula, es decir, sin manipular. En el ejemplo del cambiador al no considerarse acumulación de líquido en el mismo y no pueden considerarse independientemente los caudales de proceso de entrada y salida, es decir, sólo cabe instalar una válvula, bien en la corriente de entrada bien en la de salida.

Es importante tener en cuenta que la existencia de las corrientes de energía en una unidad sólo debe considerarse si ésta no es de proceso, es decir sólo debe considerarse si es intercambio con el exterior del sistema considerado. A continuación se muestra un ejemplo que ilustra esta advertencia. Sea un reactor con precalentamiento de la alimentación con los productos de reacción como en la figura. El número de GL será:



Nip = 1

Reactor: $\text{not} = 1, H=0, A=0 \rightarrow 1$

Cambiador: $\text{not}=2, A=2, H=0 \rightarrow 0$

GL del proceso = $1 + 1 + 0 = 2$

Como puede verse, a pesar de haber intercambio de energía en este caso no se contabiliza al ser corrientes de proceso y $H = 0$. El valor de A será 2 en caso de que no se quiera controlar ningún nivel; en caso de que se quisiera controlar alguno, para que afecte al área de intercambio por ejemplo, entonces sería $A=1$, y los grados de libertad de la unidad quedarían en 1.)

5.3.1. Expresión alternativa cuando existe intercambio de energía térmica

Cuando hay intercambio de energía térmica por medio de un fluido auxiliar la fórmula vista considera la H como uno, pues el calor aportado por el fluido auxiliar es un grado de libertad. Se podría

considerar el intercambio entre dos corrientes de proceso de esta forma teniendo en cuenta lo siguiente (con esta perspectiva no haría falta distinguir si las corrientes son auxiliares o no):

Para la corriente de proceso que nos interesa su temperatura se aplica la fórmula tal cual, pero para la otra corriente de proceso la fórmula ya no debe incluir la H y además debe restar uno a los grados de libertad que obtiene (le llamaremos restricción R), pues es utilizado por la otra corriente. Es decir, haciéndolo de esta forma se deben calcular los grados de libertad separados de las dos partes.

Ejemplo: **Cambiador** (con dos corrientes de proceso o una de proceso y una auxiliar)

Corriente de la que se desea mantener su temperatura:

$$\text{GL lado uno: } \text{nip}(=1) + \text{not}(=1) - A(=1) + H(=1) = 2$$

Otra corriente:

$$\text{GL lado dos: } \text{nip}(=1) + \text{not}(=1) - A(=1) - R(=1) = 0$$

$$\text{GL totales: } 2 + 0 = 2$$

Es decir, en realidad cada equipo independiente tiene un grado de libertad, lo que el intercambio térmico permite hacer es que una de las corrientes utilice un grado de libertad de la otra, por tanto una tiene $H=1$ y la otra tiene que restar $R=1$

Realizado como un único equipo se había ya deducido:

$$\text{GL cambiador} = \text{nip}(=2) + \text{not}(=2) - A(=2) = 2$$

En definitiva se pueden determinar los grados de libertad como si fuera un único equipo o como dos equipos que intercambian energía.

Ejemplo: **Horno de proceso**

Considerando el factor de restricción:

$$\text{Lado de proceso: } \text{nip}(=1) + \text{not}(=1) - A(=1) + H(=1) = 2$$

$$\text{Lado hogar: } \text{nip}(=2) + \text{not}(=1) - A(=0) + H(=0) - R(=1) = 2$$

$$\text{GL conjunto: } 2 + 2 = 4$$

Forma estándar:

$$\text{nip}(=3) + \text{not}(=2) - A(=1) + H(=0) = 4$$

5.4. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE ESTRATEGIAS DE CONTROL

La metodología se define estableciendo una serie de pasos sucesivos para el desarrollo del análisis. A continuación se describen genéricamente cada uno de estos pasos, que serán aplicados en la práctica en capítulos sucesivos.

5.4.1. Establecimiento del número de grados de libertad para el control (Paso 1)

Mediante el procedimiento descrito anteriormente se calcula el número máximo de grados de libertad para control que existen en el proceso u operación considerados. El valor calculado será, como se indica, un valor máximo, es decir no se podrá establecer un mayor número de variables controladas, pero sí un menor número, si, por razones de proceso, se renuncia a determinados controles.

5.4.2. Identificación de las variables controladas y manipuladas, restricciones y perturbaciones (Paso 2)

El concepto de variable controlada, variable manipulada y perturbación ya se ha abordado en el capítulo de introducción al describir conceptualmente el lazo en realimentación. El concepto de restricción se aplica a aquellas variables que, por razones de proceso, no deben sobrepasar un valor determinado (por encima o por debajo) pero que, en principio, no se tiene interés en que mantengan un determinado valor, una consigna. El tratamiento de estas variables de restricción es distinto del de las variables controladas como se verá en las aplicaciones.

Para definir qué variables han de ser o conviene que sean controladas hay que analizar el sistema desde un punto de vista de proceso. Como pauta se pueden ir siguiendo los controles requeridos para cada uno de los objetivos generales comentados en el mencionado capítulo de introducción, esencialmente se atenderá qué variables afectan a la **seguridad y estabilidad** de funcionamiento, a la **calidad** de los productos generados y la **rentabilidad** de la operación.

La seguridad vendrá típicamente afectada por evitar que la presión y la temperatura alcancen ciertos valores máximos, en este sentido proveerá ciertos valores de restricción para estas variables. Otro ejemplo habitual de variable tratada como restricción será la pérdida de carga en columnas susceptibles de inundarse. La estabilidad requerirá como primer paso, en general, el mantenimiento de los inventarios, es decir, de los balances de materia. El balance de los elementos líquidos se materializa en la estabilidad de los niveles y el balance de los elementos gaseosos en el mantenimiento de las presiones. Así pues, niveles y presiones de cada uno de los recipientes serán en general variables que deban controlarse. También el caudal de alimentación, frecuentemente denominada carga de trabajo, afecta a la estabilidad de operación y podrá ser una variable a controlar, si bien en muchas ocasiones su valor vendrá condicionado por los caudales de salida de las unidades aguas arriba, en cuyo caso se deberá considerar como una perturbación. Como excepciones también típicas pueden mencionarse los niveles de los tanques pulmón o de almacenamiento que, por su propia filosofía de funcionamiento no deberán ser controlados sino solo monitorizados. Tampoco se controlará la presión en los recipientes que trabajen a presión atmosférica, que queda garantizada por la simple conexión al aire de los recipientes involucrados. La calidad suele requerir el mantenimiento de concentraciones en determinadas corrientes. Estas concentraciones, medidas directamente con analizadores o inferidas por alguna otra variable, temperatura, pH, etc. serán otro grupo habitual de variables controladas. Respecto al último de los objetivos citados, la rentabilidad, suele ser el objeto de lazos más complejos, por encima del control regulatorio, por lo que se abordará más adelante.

Como perturbaciones típicas deberán analizarse la influencia de las variaciones en las condiciones de entrada (presión, temperatura, caudal o composiciones) así como la potencial influencia de factores atmosféricos (la lluvia por ejemplo puede afectar notablemente el funcionamiento de columnas de destilación y otros equipos intemperie al favorecer la pérdida de energía al exterior).

La identificación de las posibles variables manipuladas se suele hacer fácilmente mediante la identificación de aquellas corrientes susceptibles de soportar una válvula de control (o en general otro elemento final). Como precaución general deberá atenderse a no incorporar más de una válvula en cada corriente ya que en ese caso sólo influiría aquella que se encontrara más cerrada. Tras la identificación de las posibles variables manipuladas podrá encontrarse que su número es igual, superior o inferior al de variables manipuladas. Si es igual posibilitará directamente el establecimiento de ese mismo número de lazos simples realimentados. Si fuese mayor querría decir que se tiene la capacidad de escoger la mejor opción, es decir, se puede optimizar el funcionamiento mediante la selección de la MV más adecuada. Si la selección es permanente se tendría un número de lazos igual al de CV's. Si la selección quisiera hacerse en función de las condiciones de l proceso en cada momento se tendría una capacidad de optimización mediante aplicaciones de control avanzado. Por último, si el número de CV's fuese menor que el de CV's, el sistema no tendría solución.

5.4.3. Preasignación de estrategias (Paso 3)

Un primer avance en el emparejamiento de cada CV con cada MV puede darse en razón a la experiencia en un caso concreto idéntico o por la obviedad de la relación entre ellas. Esta preasignación debe sin embargo establecerse con máxima precaución y ante cualquier elemento de duda pasar sin preasignación al siguiente paso. A menudo lo inicialmente obvio puede resultar erróneo.

Para el resto de variables no preasignadas se establecería el análisis del siguiente paso.

5.4.4. Análisis de las ganancias en condiciones estacionarias (Paso 4)

En este paso se intenta establecer la relación existente entre las distintas parejas de CV's y MV's. Se denomina ganancia de proceso de cada para cada pareja de variables manipulada-controlada al cociente entre un determinado incremento en cada posible MV y el incremento que éste provoca una vez alcanzadas condiciones estacionarias en la CV.

La **Figura 5. 2** muestra ejemplos de las posibles respuestas de una CV frente a una perturbación en una MV. El análisis de la ganancia debe prestar atención a 1) el signo 2) la magnitud 3) la dinámica y 4) su variabilidad en el intervalo de trabajo.

1) El signo. Respecto al signo, la ganancia podrá ser positiva o negativa, según que a un aumento de la MV se corresponda un aumento o una disminución de la CV, pero este aspecto tendrá influencia exclusivamente en la especificación de la acción del controlador, salvo que se dé un cambio de signo durante el proceso transitorio, como en los no muy frecuentes pero significativos casos de ganancia inversa, en cuyas circunstancias el conocimiento de esta variación de signo puede condicionar la selección de la pareja idónea CV-MV. La detección de este cambio de signo es en todo caso objeto de un análisis dinámico que no se efectúa en este paso sino en el séptimo. En la citada figura se muestran respuestas con signo positivo (1, 2 y 3). Negativo: curva 5; respuesta inversa, curva 6 y respuesta nula, curva 4, lo que mostraría que ese emparejamiento de CV y MV es totalmente ineficaz para control.

2) La magnitud. La magnitud de la ganancia del proceso, $K_p = \Delta CV / \Delta MV$, condiciona cuál debiera ser la ganancia del controlador y/o del elemento final de control, para, en conjunto, obtener una determinada ganancia del lazo del control, como se ha comentado al tratar de las válvulas de control. Si la ganancia del proceso es pequeña, la del controlador deberá ser mayor y viceversa. Ganancias muy pequeñas o nulas significarán la inviabilidad de la estrategia de control considerada, es decir, lo inapropiado del emparejamiento CV - MV seleccionado.

3) La dinámica de la respuesta. Esto es la evolución de la CV desde su valor anterior a la perturbación de la MV hasta alcanzar su nuevo valor estacionario. La evolución de la CV tras la perturbación de la MV puede ser más o menos rápida hasta llegar a las nuevas condiciones estacionarias.

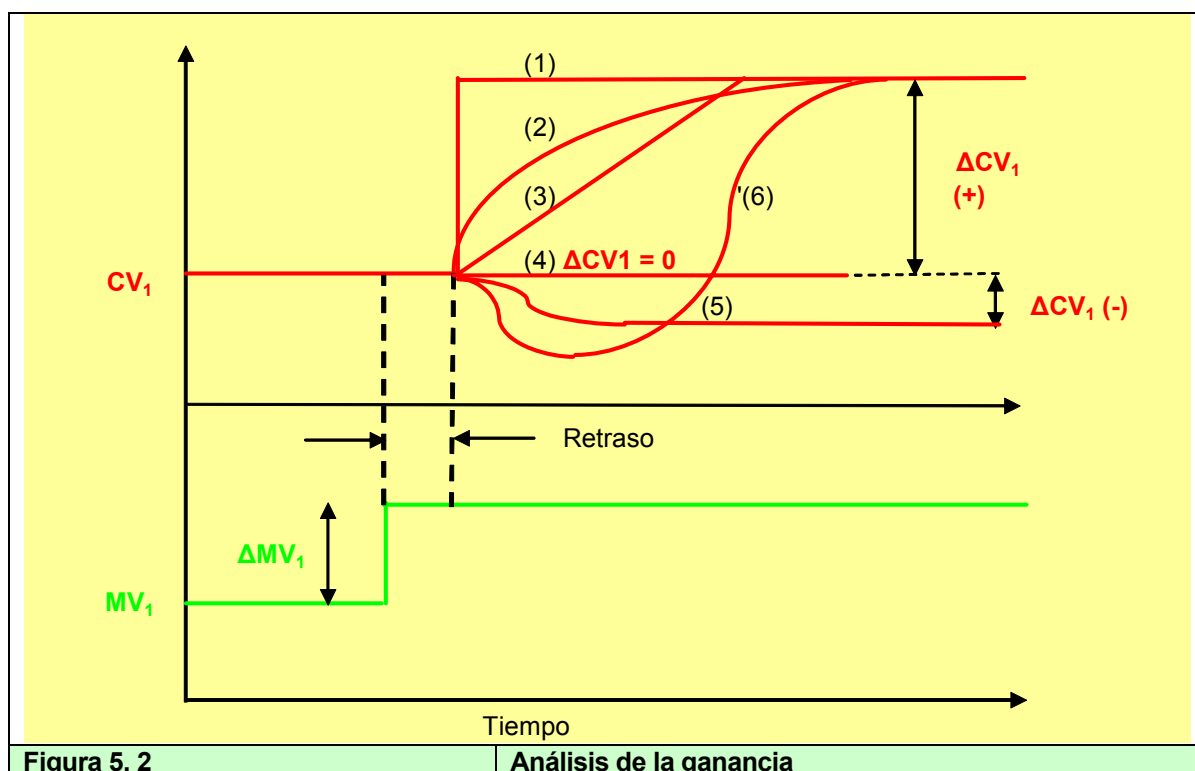


Figura 5. 2

Análisis de la ganancia

4) La variación con el rango. Especialmente importante resulta no tanto el valor de la ganancia como su constancia a lo largo del rango de trabajo. Si la ganancia del proceso es constante, es decir el proceso tiene un comportamiento lineal cualquiera que sea el valor de la CV de la que se parte al iniciar la perturbación, el controlador y la válvula, teniendo también un comportamiento lineal, contribuirán a una ganancia constante del lazo. Si la ganancia del proceso es no-lineal, debería seleccionarse un controlador y/o una válvula con ganancia también no-lineal.

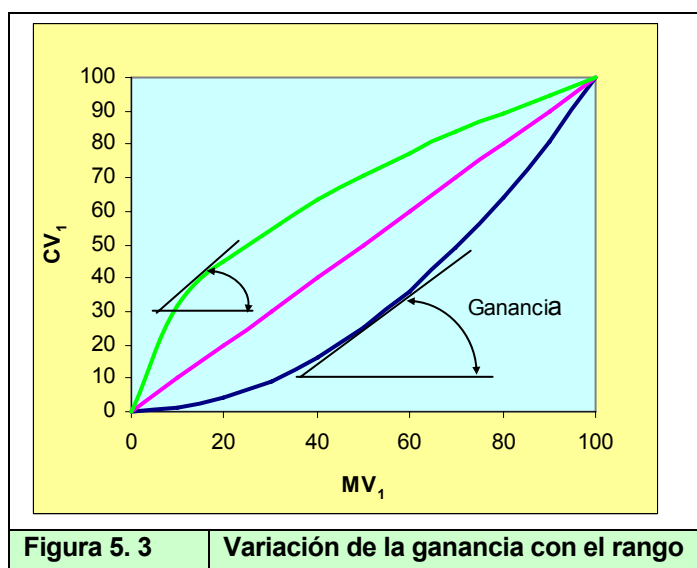


Figura 5. 3

Variación de la ganancia con el rango

La determinación de la ganancia se debe establecer mediante el planteamiento directo de las ecuaciones que rigen las relaciones entre las distintas parejas de CV's y MV's identificadas, es decir, mediante el establecimiento de un modelo del proceso. Este modelo puede ser aproximado, se plantean las ecuaciones para su resolución manual con ciertas simplificaciones, o puede ser riguroso, utilizando herramientas de cálculo tipo Matlab o simuladores tipo ASPEN PLUS. En general las ecuaciones se plantean en función de los balances de materia y energía, las relaciones de equilibrio, la cinética química, los mecanismos de transferencia de materia y/o energía y las dimensiones de los equipos involucrados. La selección entre las distintas opciones dependerá de la complejidad de cada caso, lo esclarecedor que pueda resultar el cálculo aproximado, la disponibilidad del software mencionado, la utilización del simulador para otros fines (diseño del proceso por ejemplo) que justifique el esfuerzo de modelización necesario, etc.

En cualquier caso el análisis de las conclusiones se efectúa frecuentemente mediante la representación gráfica de la variación de cada CV con cada MV de las estrategias en estudio.

A la vista de las conclusiones del análisis anterior se podrán establecer la o las mejores estrategias para cada CV desde un punto de vista estacionario.

5.4.5. Análisis de sensibilidad o robustez (Paso 5)

Una vez seleccionadas las estrategias preferidas tras los pasos anteriores se debe proceder al análisis de su robustez, es decir su estabilidad frente a las posibles perturbaciones de cada estrategia. ¿Qué otras variables? y ¿en qué medida? influyen en la ganancia. Para este análisis se utilizará en general el mismo modelo que se haya utilizado para la determinación de las ganancias en el paso anterior.

La materialización de este análisis frecuentemente se lleva a cabo por medios de representaciones gráficas en las que se muestra como parámetro los distintos posibles valores de cada variable que puede perturbar la ganancia de la pareja de variables considerada.

5.4.6. Análisis de interacciones (Paso 6)

Ha de resaltarse que al determinar las ganancias estacionarias en el paso 4, sea cual sea el procedimiento aplicado entre los mencionados anteriormente, se ha considerado que el resto de las variables de proceso ajenas a la CV y MV involucradas son perfectamente estables, es decir, el resto de los lazos al margen del analizado en cada momento (que está abierto) estarían cerrados y perfectamente controlados. Esto significa que no se han tenido en cuenta posibles interacciones entre lazos. Para cuantificar estas interacciones se puede emplear la técnica de la matriz de ganancias relativas [Ref.5. 2] que se describe a continuación brevemente

MATRIZ DE GANANCIAS RELATIVAS

Introducción a la matriz de ganancias relativas

Uno de los problemas que surge cuando se consideran varios lazos sencillos simultáneamente es que una variable manipulada puede afectar a más de una variable controlada. Este problema se conoce como "interacción" y hace más difícil el control de los bucles. Esto se produce debido a que, cuando se modifica el valor de una variable manipulada con objeto de regular el comportamiento de una variable controlada, dicha manipulación afectará a otras variables de salida distintas a la que se pretendía modificar. La solución en estos casos es, o bien elegir unas parejas en las que no haya interacción (o haya la menor posible), o bien desacoplar la interacción entre los bucles de alguna forma. La segunda de las opciones se tratará al comentar las distintas estrategias de control avanzado. La primera, la elección de parejas que no interaccionen, requiere la disponibilidad de

alguna técnica que permita identificar cuándo dicha interacción existe. Una de esas técnicas es la llamada matriz de ganancias relativas (denominada habitualmente RGA por sus siglas en inglés).

La ganancia relativa de cada posible estrategia es el cociente entre la ganancia de la pareja de variables CV y MV cuando el resto de los lazos están abiertos, es decir que el resto de las MV's se mantienen constantes, y la ganancia de esa misma pareja cuando el resto de los lazos están cerrados, es decir funcionando en automático de forma que el resto de las CV's se mantienen constantes. Esto equivale a definir la ganancia relativa como la relación entre el comportamiento de ese lazo cuando es único frente a cuando actúa en presencia de otros.

La RGA ha sido ampliamente utilizada como una medida de las interacciones entre las distintas variables del proceso y como una herramienta para la selección de la mejor estructura en sistemas de control descentralizado (multilazo). La selección de las variables se hace con el objeto de minimizar las interacciones entre los bucles de control. Muchas de las más importantes propiedades de los sistemas en bucle cerrado, tales como la estabilidad o la controlabilidad, pueden ser inferidas a partir de la RGA.

Aplicación para el caso más simple (2 entradas, 2 salidas)

Considérese el siguiente caso con dos variables manipuladas y dos a controlar a partir de las anteriores.

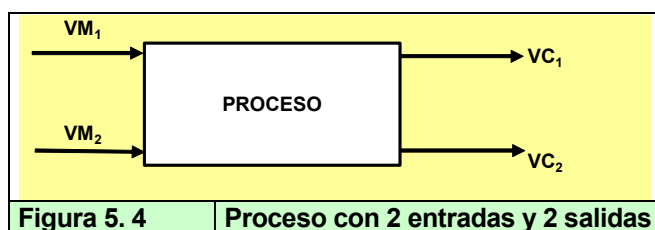


Figura 5. 4 Proceso con 2 entradas y 2 salidas

Desde una perspectiva de diseño de control, necesitamos seleccionar qué variable manipulada, MV_1 o MV_2 , resulta óptima para regular la variable controlada CV_1 (evidentemente CV_2 será controlada por la otra variable manipulada). Se pretende tomar esta decisión en función de una estrategia de control que minimice la

interacción entre los dos bucles de control.

Para conseguir este objetivo se necesita una medida que indique el efecto relativo que tiene MV_1 en CV_1 comparado con el que tiene MV_2 sobre CV_1 . La ganancia en bucle abierto entre MV_1 y CV_1 cuando MV_2 permanece constante, es decir cuando no está actuando sobre esta última ningún lazo de control (no pueden pues existir interacciones), será

$$k_{11} = \left. \frac{\Delta CV_1}{\Delta MV_1} \right|_{MV_2}$$

Sea el caso, como muestra la figura adjunta, en el que se elige la pareja MV_2 y CV_2 para incorporar un controlador con realimentación.

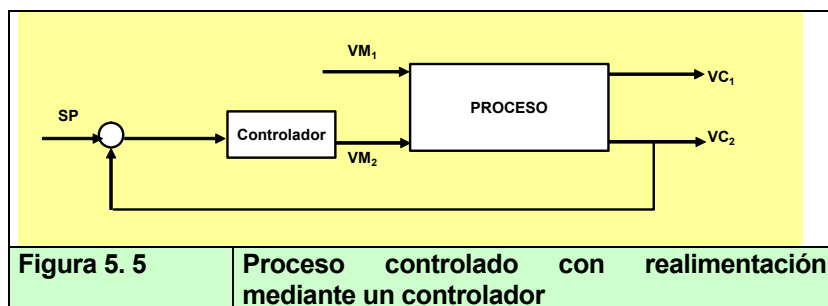


Figura 5. 5 Proceso controlado con realimentación mediante un controlador

En estas circunstancias se puede determinar una nueva ganancia en bucle abierto entre MV_1 y CV_1 en presencia de este controlador, cuyo control se supone perfecto, es decir cuando CV_2 permanece constante. Entonces la nueva ganancia k'_{11} será

$$k'_{11} = \left. \frac{\Delta CV_1}{\Delta MV_1} \right|_{CV_2}$$

Las ganancias en bucle abierto k_{11} y k'_{11} no serán, en general, iguales. En el cálculo de k'_{11} es importante notar que CV_2 permanece constante. Si se introduce un cambio en MV_1 con objeto de ajustar CV_1 , este cambio previsiblemente también alterará el valor de CV_2 . Sin embargo el controlador instalado para regular CV_2 actuará para restaurar CV_2 a su valor nominal cambiando MV_2 . Este consecuente cambio en MV_2 también provocará probablemente una variación en CV_1 . Por tanto el cambio total en CV_1 se deberá a dos componentes – el cambio debido a MV_1 y el debido a MV_2 . Por tanto k'_{11} no será en general igual a k_{11} .

De acuerdo con la definición dada la ganancia relativa será: $\lambda_{11} = \frac{k_{11}}{k'_{11}}$

Que viene a definir el comportamiento de un lazo actuando aislado frente a su comportamiento en compañía de otros lazos.

La matriz de ganancias relativas vendrá dada por el conjunto de ganancias relativas para cada emparejamiento de variables posible

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{21} \\ \lambda_{12} & \lambda_{22} \end{bmatrix}$$

Por supuesto todos los conceptos y definiciones anteriores son extrapolables a sistemas con n CV's y n MV's que darían lugar a matrices de $n \times n$. Los términos de cada fila se corresponden con las ganancias relativas de cada una de las CV's con cada una de las posibles MV's con que puede emparejarse para configurar un lazo de control. Cada columna se corresponderá con las ganancias de cada MV con cada una de las posibles CVs con que pueda constituir un lazo.

Interpretación de la ganancia relativa

Los valores de la ganancia relativa tienen una relación muy estrecha con la controlabilidad de las parejas de variables MV - CV y con su interacción con otros lazos de control. Los valores numéricos posibles y su significado son los siguientes:

Valor	Significado
$\lambda_{ij} = 1$	No hay interacción con otros lazos. El comportamiento es el mismo cuando está aislado que en presencia de otros lazos. Representa el caso perfecto de idoneidad entre la CV y la MV con ausencia de acoplamientos.
$\lambda_{ij} = 0$	La ganancia en lazo abierto tiende a cero, es decir, la variable manipulada, i , no afecta a la controlada, j . Lazo no efectivo ya que una variable es independiente de la otra al margen de potenciales efectos causados por la posible interacción con otros lazos
$\lambda_{ij} < 0.5$	Hay un alto grado de interacción. Los otros bucles de control tienen una influencia en la variable controlada, j , similar al de la propia variable manipulada, i . Si no se puede evitar su emparejamiento habría que considerar técnicas de desacoplamiento.
$0.5 < \lambda_{ij} < 1$	Hay interacción entre los bucles. Sin embargo, podría ser la pareja a seleccionar si es la que presenta las menores interacciones frente a las alternativas posibles.
$\lambda_{ij} > 1$	La interacción reduce el efecto de la MV en la CV de ese bucle de control. Se requieren ganancias mayores en el controlador para compensar la reducción de la ganancia de proceso
$\lambda_{ij} > 10$	Cuando funciona el resto de controladores la ganancia tiende a cero. Las parejas de variables con altos valores de ganancia relativa son indeseables, ya que indican alta

	reducción de la efectividad del lazo cuando entran en funcionamiento otros lazos, es decir, fuerte interacción. Significan sistemas con ganancias sensibles a pequeñas variaciones que pueden presentar problemas incluso aplicando técnicas de control basadas en modelos.
$\lambda_{ij} < 0$	Se debe tener especial cuidado con los elementos negativos de la RGA. Los elementos negativos fuera de la diagonal indican que al cerrar el bucle cambiará el signo de la ganancia efectiva. Si los elementos de la diagonal son negativos, eso puede indicar 'inestabilidad integral', es decir, el bucle de control es inestable para cualquier controlador
Tabla 5. 1	Ganancias relativas

La suma, tanto por filas (que indica la variable controlada) como por columnas (que indica la variable manipulada), debe de ser uno. En el caso de las filas eso implica que la variable controlada se explica al 100% por todas las variables manipuladas. En el caso de las columnas implica en qué porcentaje afecta esa variable manipulada a cada variable controlada.

Determinación práctica de la RGA

Para definir esta matriz se puede partir de un modelo de ecuaciones, el cual se linealiza en torno al punto de operación para calcular las diferentes ganancias. Se debe trabajar en el entorno del punto de operación, pues la matriz varía dado que las ganancias no son lineales y por tanto el cociente entre las ganancias en lazo abierto y cerrado no es el mismo según el punto en el que se esté. Sin embargo para la mayoría de los procesos químicos esto no es fácil pues requieren modelos de muchas ecuaciones con un gran cómputo de propiedades físicas lo que hace que sea difícilmente manejable a no ser que se realicen bastantes simplificaciones. Como opción, el empleo de un simulador de procesos resulta más cómodo y es más riguroso. En ese caso se procede a ir fijando las variables (según se quiera la ganancia con los lazos abiertos o cerrados) y se realizan pequeños incrementos en torno al punto de operación.

El empleo de esta matriz debe servir como indicador de qué lazos tienen problemas y qué lazos posiblemente funcionen sin interacción pero deben tomarse precauciones a la hora de sacar conclusiones definitivas empleando esta técnica ya que pudiera ocurrir que el emparejamiento que mejor funciona era uno de los descartados por el análisis de la matriz obtenida.. Cuando de la MGR se deduzcan interacciones serias o funcionamiento inestable, sería conveniente completar el análisis mediante una simulación dinámica como se describe en el siguiente paso. De confirmarse la interacción en lazos que no puedan ser sustituidos por alternativas que no presenten dichas interacciones, deberá considerarse la conveniencia y viabilidad de implementar algún procedimiento de “desacoplamiento”, que es el nombre que se aplica a aquellas técnicas de control avanzado que contrarrestan los efectos indeseables de la interacción que se tratan en un capítulo posterior.

5.4.7. Estudio del comportamiento dinámico del sistema (Paso 7)

En este paso se efectúa el análisis dinámico de lazos seleccionados estudiando el comportamiento de aquellos lazos cuya estrategia pudiera verse potencialmente más condicionada por el régimen transitorio. La elaboración de un modelo dinámico es una tarea compleja y, aún con la utilización de las modernas herramientas que permiten construir un modelo dinámico a partir de uno estacionario, puede requerir bastante tiempo.

La importancia de este paso radica en que los transitorios de los lazos escogidos pueden ser no aceptables en algunos casos y por tanto pudiera hacerse necesario cambiar la estrategia inicialmente seleccionada. También pueden detectarse posibles fallos del análisis hecho por métodos simplificados

en pasos anteriores, así como confirmar o rechazar las conclusiones obtenidas del estudio de la matriz de ganancias relativas. Entonces, ¿por qué no empezar directamente por este punto?. La razón es triple: en primer lugar no siempre será necesario, dependerá de lo contundente que pueda ser el análisis preliminar, además, dicho análisis permite reducir las configuraciones de control a probar y por último, el estudio anterior del funcionamiento del proceso o de la operación permite tener una idea conceptual clara de cómo debe responder el sistema, que es de gran ayuda a la hora de operar y establecer el modelo dinámico del mismo. El procedimiento de este paso consta de las etapas listadas en la Tabla 5. 2.

1 - Desarrollo del modelo dinámico
2 - Asignación de los lazos de control y sintonización de los mismos.
3 - Comprobación del comportamiento ante perturbaciones.
4 - Comprobación del comportamiento ante cambios de punto de consigna.
5 - Comprobación del comportamiento con algunos lazos en manual.
Tabla 5. 2 Procedimiento para el desarrollo del análisis dinámico

En resumen la metodología anteriormente descrita tiene dos partes claramente diferenciadas, la primera, pasos 1 a 5, se basa en el conocimiento del proceso u operación básica que se está considerando y permite plantear unas estrategias de control. La segunda parte, pasos 6 y 7, se centra en el análisis dinámico y requiere imprescindiblemente la utilización de modelos rigurosos.

5.5. Notación del capítulo

Sigla	Significado
7	Matriz de ganancias relativas
λ_{ij}	Ganancia relativa de la CV i y la MV j
A	No. de inventarios de líquido o gas insatisfechos (es decir niveles o presión no controlados)
C	No. de componentes
E	No. de corrientes de salida extra (por encima de una por fase)
G	Caudal molar de gas de entrada
H	Factor de intercambio de energía (=1 si existe intercambio de energía en la unidad con exterior; = 0 si no existe)
k'_{ij}	Ganancia en bucle abierto de la CV i frente a la MV j cuando el resto de las CV's = cte
k_{ij}	Ganancia en bucle abierto de la CV i frente a la MV j cuando el resto de las MV's = cte
NF	No. de fases
nip	No. de corrientes de entrada al proceso
not	No. de corrientes de salida del proceso
NU	No. de unidades
P	Presión
R	Factor de restricción (=1 si se cede un grado de libertad; = 0 si no se cede ninguno)
Tabla 5. 3	Notación el capítulo

5.6. Referencias

Ref.5. 1 - Ponton, J.W., "Degrees of Freedom Analysis in Process Control", Technical Report 1994-02 The University of Edimburgh, 1994

Ref.5. 2 - Bristol, E.H., "On a New Measure of Interactions for Multivariable Process Control", IEEE Trans. Auto. Con., 1966, AC-11:133