

JOSÉ ACEDO SÁNCHEZ

# INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL BÁSICO DE PROCESOS



© José Acedo Sánchez, 2006

Reservados todos los derechos.

«No está permitida la reproducción total o parcial de este libro, ni su tratamiento informático, ni la transmisión de ninguna forma o por cualquier medio, ya sea electrónico, mecánico por fotocopia, por registro u otros métodos, sin el permiso previo y por escrito de los titulares del Copyright.»

Ediciones Díaz de Santos.

E-mail: ediciones@diazdesantos.es

Internet: <http://www.diazdesantos.es/ediciones>

ISBN: 84-7978-759-7

Depósito legal: M. 41.307-2006

Diseño de cubierta: Ángel Calvete

Fotocomposición: Fer.

Impresión: Edigrafos.

Encuadernación: Rústica-Hilo.

Impreso en España

# Prólogo

---

Aprovechando que nos encontramos en el cuarto centenario del Quijote, y que Pepe Acedo es un manchego del Campo de Calatrava, traigo a colación un pasaje de este libro, concretamente parte de una conversación entre don Quijote y Sancho camino de la cueva de Montesinos.

«Calle señor, replicó Sancho... que para preguntar necedades y responder disparates no he de menester yo andar buscando ayuda de vecinos.

Más has dicho, Sancho, de lo que sabes, dijo Don Quijote; que hay algunos que se cansan en saber y averiguar cosas que después de sabidas y averiguadas, no importan un ardite al entendimiento y a la memoria». Ardite era una moneda de poco valor que hubo antiguamente en Castilla.

Los libros «sabios» son como filtros que dejan pasar al almacén del conocimiento únicamente lo que la buena experiencia aconseja.

Una forma de utilizar la sabiduría es, precisamente, volcar en un libro aquellos conocimientos que una vez filtrados pasan con máximo aprovechamiento a ser propiedad de los lectores.

No hay ningún sabio que no sea humilde, y la humildad no se bebe en copas de oro ni de cristal de Bohemia, sino en jarras de barro y cacharros de loza.

El Control de Procesos y la Instrumentación, sin los cuales no habría industria, tienen su fundamento y su asiento en lo más humilde de las medidas y en los conceptos más básicos.

Este libro es un buen comienzo para aquellos que quieren ser sabios en el hermoso oficio de la Instrumentación y el Control de Procesos.

La experiencia de Pepe Acedo ha filtrado adecuadamente el caudal de conocimientos de muchos años de oficio, y el resultado es un excelente libro que nos aconsejará siempre que dudemos sobre el camino a seguir en la aventura que es, entender, medir, analizar, decidir y dominar los procesos mediante técnicas de Control.

«Déjate aconsejar, hermano, por quien recorrió el camino antes que tú y salió con suerte de todos los peligros y trampas que le acecharon. Que es mejor escucharle, seguir sus consejos y llegar a la fuente, que atender a necios que se deslumbran con los colores y te llevan al estercolero»

DIEGO HERGUETA

# Introducción

---

Después de la publicación del libro «Control Avanzado de Procesos», algunas personas me sugirieron que haría falta un complemento relacionado con el control básico de procesos y algo sobre circuitos desde el punto de vista práctico.

Con este ánimo me puse a escribir sobre estos temas, siempre desde la óptica de que se consoliden los fundamentos o cimientos que constituyen el control básico, sobre el cual se pueden elaborar estrategias de control avanzado y multivariable. Por esta razón solo se incluyen aquellas fórmulas básicas necesarias para ayudar a comprender o desarrollar los temas desde el punto de vista práctico.

Es muy frecuente encontrarse con técnicos con unos grandes conocimientos teóricos sobre el control de procesos, transformadas de Laplace, algoritmos de control multivariable, etc., pero desconocen que para funcionar una válvula automática necesita una alimentación de aire a 20 psig, la cual actúa como fuente de energía para efectuar el recorrido proporcional a la señal de control neumática de 3 a 15 psig.

A propósito de este tema, el profesor Cecil L. Smith menciona en el artículo «Process Engineers: Take Control», publicado en la revista *Chemical Engineering Progress* de Agosto 2000, «Lo que un práctico necesita conocer acerca de las transformadas de Laplace puede ser enseñado en 15 minutos. Los cursos que gastan más tiempo son cursos de matemáticas».

El libro se ha dividido en cuatro partes perfectamente diferenciadas. La primera de ellas trata sobre circuitos, con los conocimientos básicos que se han de conocer para comprender el funcionamiento de lazos de control.

La segunda parte se denomina genéricamente cálculos, en la cual se incluyen algunos de los que se utilizan en el campo de la instrumentación. En esta parte también se incluye un apartado sobre prácticas de ingeniería que son la recopilación de experiencias que pueden ayudar a no caer en los mismos errores que han caído otras personas.

La tercera parte se dedica a explicar los conceptos básicos de algunos de los equipos que se utilizan para llevar a cabo el control de procesos.

Por último, la cuarta parte trata del control básico propiamente dicho, incluyendo ejemplos de cómo se deben controlar las variables de proceso.

También se contempla un glosario de términos que siempre es útil para conocer definiciones y el significado de ciertos acrónimos que se utilizan con frecuencia sin saber exactamente su origen o significado.

Quiero expresar mi agradecimiento a dos compañeros, al mismo tiempo que amigos, que me han ayudado a mejorar el contenido de este libro por medio de ideas, correcciones y comentarios al texto original.

- Francisco Javier Sanz Bermejo. Técnico del Departamento de Control Avanzado y Sistemas de Repsol en la Refinería de Puertollano.
- Francisco Cifuentes Ochoa. Técnico de la Subdirección de Control Avanzado de Repsol en Madrid.

Como último escalón, en sentido ascendente, se encuentra Diego Hergueta G. de Ubieta, Subdirector de Control Avanzado de Repsol en Madrid, junto con al cual formé uno de los primeros equipos de técnicos que se dedicaron a esto del control de procesos hace ya bastantes años. Seguimos teniendo la complicidad que da el haber pasado momentos buenos y menos buenos en el aspecto técnico, porque en lo personal nos consideramos buenos amigos.

Igual que el libro anterior, este lo quiero dedicar a mi familia, sobre todo a Juani por su comprensión, teniendo en cuenta las horas que he tenido que permanecer junto al ordenador.

PEPE ACEDO

# Índice

<b>PARTE I. CIRCUITOS .....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 1. ELECTRICIDAD BÁSICA .....</b>	<b>3</b>
1.1. CONCEPTOS GENERALES .....	3
1.2. PARÁMETROS Y LEY FUNDAMENTAL DE UN CIRCUITO ELÉCTRICO ....	6
1.3. RESISTENCIAS .....	13
1.4. PILAS, ACUMULADORES Y FUENTES DE ALIMENTACIÓN .....	21
1.5. CAPACIDADES .....	25
1.6. CAMPO MAGNÉTICO .....	30
1.7. CORRIENTE ALTERNA .....	38
<b>CAPÍTULO 2. ELECTRÓNICA BÁSICA .....</b>	<b>43</b>
2.1. INTRODUCCIÓN A LA ELECTRÓNICA .....	43
2.2. FUENTE DE ALIMENTACIÓN .....	44
2.3. AMPLIFICACIÓN .....	54
2.4. OSCILACIÓN .....	66
2.5. OTROS COMPONENTES ELECTRÓNICOS .....	72
<b>CAPÍTULO 3. CIRCUITOS LÓGICOS .....</b>	<b>79</b>
3.1. INTRODUCCIÓN .....	79
3.2. SISTEMAS DE NUMERACIÓN .....	80
3.3. ÁLGEBRA DE BOOLE .....	83
3.4. PUERTAS LÓGICAS .....	94
3.5. CIRCUITOS CON REALIMENTACIÓN .....	99
3.6. MULTIVIBRADORES .....	102
3.7. CONTADORES Y TEMPORIZADORES .....	106
<b>CAPÍTULO 4. SISTEMA DE ALIMENTACIÓN ININTERRUMPIDA .....</b>	<b>111</b>
4.1. CONCEPTOS GENERALES .....	111

4.2. RECTIFICADOR DE POTENCIA .....	116
4.3. SISTEMA DE CORRIENTE CONTINUA .....	118
4.4. INVERSOR ESTÁTICO .....	122
4.5. SISTEMA DE CORRIENTE ALTERNA .....	124
4.6. SISTEMA REDUNDANTE .....	126
BIBLIOGRAFÍA .....	128
 <b>CAPÍTULO 5. PROTECCIÓN EN ATMÓSFERAS PELIGROSAS .....</b>	<b>129</b>
5.1. CONSIDERACIONES GENERALES .....	129
5.2. SEGURIDAD INTRÍNSECA .....	130
5.3. PRINCIPALES ORGANIZACIONES EN SEGURIDAD .....	132
5.4. CLASIFICACIÓN DE ÁREAS PELIGROSAS .....	133
5.5. AGRUPAMIENTO DE APARATOS Y GASES .....	134
5.6. CLASIFICACIÓN DE TEMPERATURAS .....	134
5.7. MÉTODOS DE PROTECCIÓN .....	136
5.8. SISTEMA DE PROTECCIÓN «IP-» EN CAJAS ENVOLVENTES .....	141
5.9. APARATOS EN ÁREA PELIGROSA .....	143
5.10. EQUIPOS EN ÁREA SEGURA .....	144
5.11. SISTEMAS INTRÍNSECAMENTE SEGUROS .....	145
5.12. SEGURIDAD INTRÍNSECA CON BARRERAS ZENER .....	148
5.13. SEGURIDAD INTRÍNSECA CON AISLADORES GALVÁNICOS .....	152
5.14. REQUERIMIENTOS DE PUESTA A TIERRA .....	155
5.15. CABLES Y ACCESORIOS .....	156
5.16. ELEMENTOS DE TEMPERATURA .....	160
5.17. OPERACIONES DE MANTENIMIENTO .....	160
5.18. DIRECTIVAS ATEX .....	161
BIBLIOGRAFÍA .....	166
 <b>CAPÍTULO 6. ALIMENTACIONES NEUMÁTICAS Y ELÉCTRICAS .....</b>	<b>167</b>
6.1. INTRODUCCIÓN .....	167
6.2. AIRE DE INSTRUMENTOS .....	167
6.3. ALIMENTACIÓN ELÉCTRICA .....	179
BIBLIOGRAFÍA .....	185
 <b>CAPÍTULO 7. SIMBOLOGÍA E IDENTIFICACIÓN DE LAZOS .....</b>	<b>187</b>
7.1. IDENTIFICACIÓN .....	187
7.2. LÍNEAS Y FUNCIONES .....	188

7.3. SÍMBOLOS .....	192
7.4. DEFINICIONES .....	194
BIBLIOGRAFÍA .....	202
<b>PARTE II. CÁLCULOS .....</b>	<b>203</b>
<b>CAPÍTULO 8. ERRORES EN LAS MEDIDAS .....</b>	<b>205</b>
8.1. INTRODUCCIÓN .....	205
8.2. TERMINOLOGÍA .....	206
8.3. CLASIFICACIÓN DE ERRORES .....	209
8.4. PROCEDENCIA DE LOS ERRORES .....	211
8.5. MÉTODOS ESTADÍSTICOS .....	214
8.6. EVALUACIÓN Y CORRECCIÓN DE ERRORES .....	218
8.7. ERROR DE UN SISTEMA DE MEDIDA .....	222
BIBLIOGRAFÍA .....	226
<b>CAPÍTULO 9. CÁLCULO DE ELEMENTOS PARA MEDIR CAUDAL .....</b>	<b>227</b>
9.1. INTRODUCCIÓN .....	227
9.2. PRINCIPIO DEL MÉTODO DE MEDIDA Y CÁLCULO .....	227
9.3. FÓRMULAS DE CÁLCULO UTILIZADAS .....	231
9.4. RANGOS Y LÍMITES DE APLICACIÓN .....	237
9.5. DIAGRAMAS DE FLUJO .....	240
9.6. TABLAS .....	243
<b>CAPÍTULO 10. HYDROSTATIC TANK GAUGING .....</b>	<b>247</b>
10.1. CONCEPTOS GENERALES .....	247
10.2. ECUACIONES DE CÁLCULO .....	250
10.3. CÁLCULO DE ERRORES .....	252
10.4. PRIMER EJEMPLO DE CÁLCULO DE ERRORES .....	254
10.5. SEGUNDO EJEMPLO DE CÁLCULO DE ERRORES .....	256
10.6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS .....	257
BIBLIOGRAFÍA .....	260
<b>CAPÍTULO 11. PRÁCTICAS DE INGENIERÍA .....</b>	<b>261</b>
11.1. INTRODUCCIÓN .....	261
11.2. CAUDAL .....	261
11.3. TEMPERATURA .....	271



xiv	INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL BÁSICO DE PROCESOS
11.4. PRESIÓN .....	276
11.5. NIVEL .....	279
BIBLIOGRAFÍA .....	283
<b>CAPÍTULO 12. FACTORES DE ESCALADO .....</b>	<b>285</b>
12.1. INTRODUCCIÓN .....	285
12.2. COEFICIENTES PARA SUMADOR .....	288
12.3. COEFICIENTES PARA MULTIPLICADOR .....	292
12.4. COEFICIENTES PARA DIVISOR .....	296
<b>PARTE III. EQUIPOS PARA CONTROL .....</b>	<b>299</b>
<b>CAPÍTULO 13. SISTEMA DE CONTROL DISTRIBUIDO .....</b>	<b>301</b>
13.1. CONTROL ANALÓGICO .....	301
13.2. CONTROL DISTRIBUIDO .....	303
13.3. SEGURIDAD DEL SISTEMA .....	313
BIBLIOGRAFÍA .....	318
<b>CAPÍTULO 14. SISTEMA DE GESTIÓN DE LA SEGURIDAD .....</b>	<b>319</b>
14.1. INTRODUCCIÓN .....	319
14.2. CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE .....	323
14.3. SEGURIDAD BASADA EN IEC 61508 E IEC 61511 .....	335
14.4. SISTEMA DE ENCLAVAMIENTOS ( <i>INTERLOCK</i> ) .....	341
14.5. EJEMPLO DE SISTEMA DE ENCLAVAMIENTO .....	345
BIBLIOGRAFÍA .....	351
<b>CAPÍTULO 15. ELEMENTOS FINALES DE CONTROL .....</b>	<b>353</b>
15.1. INTRODUCCIÓN .....	353
15.2. VÁLVULAS AUTOMÁTICAS .....	353
15.3. VÁLVULAS MOTORIZADAS .....	376
15.4. <i>DAMPERS</i> .....	378
BIBLIOGRAFÍA .....	383
<b>CAPÍTULO 16. VARIADORES DE VELOCIDAD .....</b>	<b>385</b>
16.1. INTRODUCCIÓN .....	385
16.2. CONCEPTOS GENERALES DEL VARIADOR .....	386
16.3. EQUIPOS DE PROCESO .....	392
BIBLIOGRAFÍA .....	400

<b>PARTE IV. CONTROL BÁSICO .....</b>	<b>401</b>
<b>    CAPÍTULO 17. CONTROL Y ALGORITMOS BÁSICOS .....</b>	<b>403</b>
17.1. INTRODUCCIÓN .....	403
17.2. DESCRIPCIÓN DE UN CONTROLADOR .....	403
17.3. TIPOS DE ECUACIÓN .....	413
17.4. ALGORITMOS DE CONTROL .....	415
17.5. ALGORITMOS AUXILIARES .....	422
BIBLIOGRAFÍA .....	425
<b>    CAPÍTULO 18. MEDIDA Y CONTROL DE VARIABLES BÁSICAS .....</b>	<b>427</b>
18.1. VARIABLES BÁSICAS .....	427
18.2. MEDIDA Y CONTROL DE CAUDAL .....	429
18.3. MEDIDA Y CONTROL DE NIVEL .....	440
18.4. MEDIDA Y CONTROL DE PRESIÓN .....	450
18.5. MEDIDA Y CONTROL DE TEMPERATURA .....	457
BIBLIOGRAFÍA .....	466
<b>    CAPÍTULO 19. CONTROL CON VÁLVULAS EN SERIE Y PARALELO .....</b>	<b>469</b>
19.1. INTRODUCCIÓN .....	469
19.2. VÁLVULAS EN PARALELO .....	471
19.3. VÁLVULAS EN RANGO PARTIDO .....	478
19.4. VÁLVULAS EN OPOSICIÓN .....	484
19.5. REFLUJOS CIRCULANTES .....	485
<b>    CAPÍTULO 20. GLOSARIO DE TÉRMINOS .....</b>	<b>491</b>
<b>    ÍNDICE TEMÁTICO .....</b>	<b>509</b>

# Factores de escalado

## 12.1. Introducción

A la hora de configurar algoritmos auxiliares de cálculo existen ecuaciones matemáticas que relacionan diferentes variables de control básico. Algunos sistemas de control distribuido disponen de autoescalado, pero otros no disponen de esta característica, por lo que es necesario transformar las ecuaciones expresadas en unidades de ingeniería a otras normalizadas compatibles con los sistemas de control.

En este capítulo se trata de exponer algunos procedimientos de escalado, que por una parte son necesarios en algunos equipos de control, y por otra ayudan a comprender su comportamiento cuando se realiza de forma automática.

Los factores de escalado son las constantes que se aplican en las ecuaciones de los algoritmos de cálculo tales como sumadores, multiplicadores, etc. Se pueden aplicar tanto a elementos neumáticos como electrónicos o bien a los algoritmos realizados por medio de *software* de usuario.

Los *slots* básicos de cálculo de los sistemas de control distribuido suelen tener dos entradas de proceso, por lo que en los desarrollos que se presentan en este capítulo solo se contempla esa posibilidad.

### 12.1.1. Necesidad del escalado

Esta necesidad surge con objeto de diferenciar las variables expresadas en unidades de ingeniería de las variables normalizadas. Las variables de proceso clásicas, caudal, presión o temperatura, se expresan en unidades de ingeniería tales como  $\text{m}^3/\text{h}$ ,  $\text{kg}/\text{cm}^2$ ,  $^{\circ}\text{C}$ , respectivamente, mientras que las señales procedentes de los transmisores son proporcionales a las unidades de ingeniería pero con un rango estándar para transmitir señales. Por ejemplo, un transmisor electrónico genera una señal de 4 a 20 mA independientemente de si la variable es caudal, presión, etc., y de su rango de calibración en unidades de ingeniería.

La Figura 12.1 representa la salida de un transmisor electrónico calibrado entre 100 y 500  $^{\circ}\text{C}$  generando una señal de salida comprendida entre 4 y 20 mA. Se supone que la respuesta es lineal, por lo que a 12 mA le corresponden 300  $^{\circ}\text{C}$ .

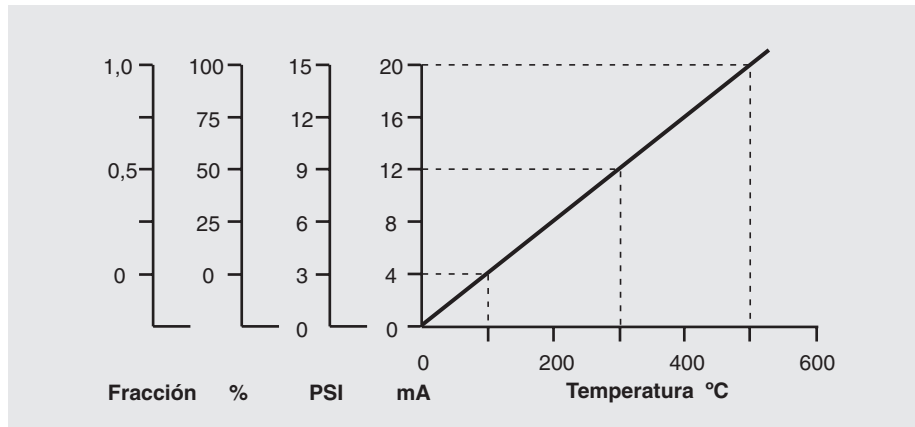


Figura 12.1

La señal se transmite en el rango de 4 a 20 mA y la conversión en el sistema puede ser tan simple como calibrar la escala de medida entre 100 y 500 °C, o tan compleja como sea necesario para ejecutar cálculos en una aplicación de control avanzado.

En la Figura 12.1, además de la señal estándar de 4 a 20 mA, también aparecen otros rangos que pueden ser asignados a las variables, como 3 a 15 PSI, 0 a 100 % o 0 a 1.

La Figura 12.2 muestra un ejemplo de combustión en un horno industrial con dos combustibles, fuel-oil y fuel-gas. En este esquema el indicador FI-4 necesita medir la cantidad total de combustible en términos coherentes de calor o fuel-oil equivalente, con la particularidad de que el fuel-gas tiene mayor poder calorífico que el fuel-oil. Como consecuencia, tomando como referencia el fuel-oil será necesario aplicar un factor de corrección a la medida de fuel-gas, quedando una ecuación, en unidades de ingeniería, como la siguiente:

$$FI4.PV = A * FI1.PV + FI2.PV$$

donde  $A$  es el factor que hace compatibles los poderes caloríficos de ambos combustibles.

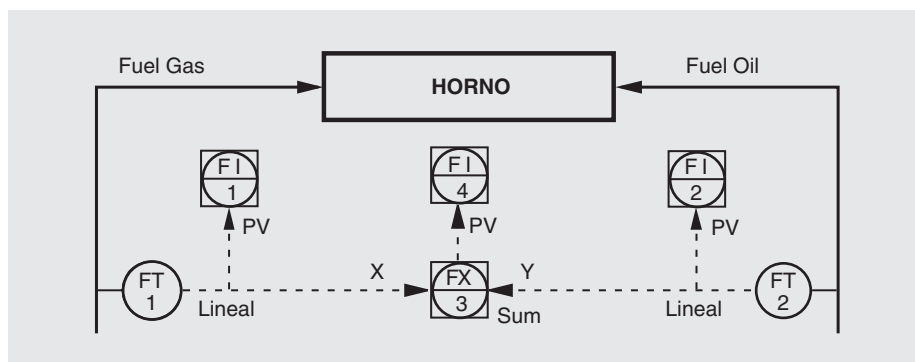


Figura 12.2

En este ejemplo se supone que el poder calorífico del fuel-oil es de 9.000 Kcal/kg, mientras que el del fuel-gas es de 11.000 Kcal/kg. El rango de medida de caudal de fuel-oil es de 0 a 800 kg/h, el de fuel-gas de 0 a 200 kg/h y el de fuel-oil equivalente es de 0 a 1.000 kg/h.

El valor del coeficiente  $A$  será:

$$A = \frac{11.000}{9.000} = 1,222$$

Aplicando los datos directamente se obtiene la ecuación de ingeniería que proporciona la medida del indicador  $FI-4$ , la cual corresponde a salida del sumador  $FX-3$ .

$$FI4.PV = 1,222 * FI1.PV + FI2.PV$$

Tomando como ejemplo un caudal de 500 kg/h de fuel-oil y 150 kg/h de fuel-gas, se tendrá un caudal de fuel-oil equivalente:

$$FI4.PV = 1,222 * 150 + 500 = 683,3 \text{ kg/h}$$

En este ejemplo vamos a suponer que la conversión de medidas a la entrada al sumador corresponde a la escala porcentual de la Figura 12.1, por lo que se puede construir la tabla siguiente, en la que los valores de entrada y salida están normalizados respecto de sus rangos en unidades de ingeniería.

La entrada al indicador  $FI-4$  debe corresponder con la salida del sumador  $FX-3$ , tanto en valor porcentual de medida como en unidades de ingeniería, luego el valor de referencia ha de ser el rango del  $FI-4$ .

Fuel-gas (kg/h)	X (%)	Fuel-oil (kg/h)	Y (%)	Fuel-oil equivalente	FX-3.OUT = FI-4.PV (%)
200	100	0	0	$200 * 1,222$ $= 244,4$	$100 * 244,4/1.000$ $= 24,44$
0	0	800	100	800	$100 * 800/1.000$ $= 80$
150	$100 * 150/200$ $= 75$	500	$100 * 500/800$ $= 62,5$	683,3	$100 * 683,3/1.000$ $= 68,33$

La ecuación del sumador que ha de realizar este cálculo depende del fabricante del SCD, pero una muy normal es la siguiente:

$$OUT_{\%} = C1 X_{\%} + C2 * Y_{\%} + C3$$

donde  $X$  y  $Y$  son las entradas al sumador y  $C1$ ,  $C2$  y  $C3$  son constantes de escalado.

Al haber asignado la entrada  $X$  al fuel-gas y la entrada  $Y$  al fuel-oil, se ve claramente que igualando las ecuaciones de ingeniería y del sumador se tiene que  $C3 = 0$  al no existir término independiente en la de ingeniería.

Aplicando la primera línea de la tabla, en la que se puede ver que no hay consumo de fuel-oil, se cumple que la salida del sumador es igual a 24,44 % del  $FI-4$  cuando la

entrada  $X$  es igual a 100 %, o lo que es igual, 244,4 kg/h de fuel-oil equivalente. Utilizando la ecuación del sumador, al ser  $C_3 = 0$  y la entrada  $Y = 0$ , se tiene que:

$$24,44 = C1 * 100 \Rightarrow C1 = 0,2444$$

Repitiendo el mismo procedimiento con la segunda línea, en la que se puede ver que no hay consumo de fuel-gas, al aplicar la ecuación del sumador se tiene que:

$$80 = C2 * 100 \Rightarrow C2 = 0,80$$

Una vez conocidos los coeficientes se puede comprobar la tercera línea de la tabla, dando como resultado:

$$OUT_{\%} = 0,2444 * 75 + 0,80 * 62,5 = 68,33 \%$$

Al pasar esta salida del sumador al indicador se convierte automáticamente el valor porcentual a unidades de ingeniería. Con la salida porcentual del sumador, y sabiendo que el rango del  $FI-4$  es de 0 a 1.000 kg/h, la medida del indicador será:

$$FI4.PV = 1.000 * 68,33/100 = 683,3 \text{ kg/h}$$

Que corresponde exactamente con el valor que suministra la ecuación de ingeniería.

En este ejemplo se puede ver que se han seguido varios pasos para calcular los coeficientes de escalado del sumador. Estos pasos se pueden extrapolar a cualquier otro cálculo, por lo que se puede fijar el siguiente método:

- *Paso 1.* Desarrollar la ecuación de ingeniería que cumpla con el cálculo deseado.
- *Paso 2.* Normalizar las variables de entrada y salida de la ecuación de ingeniería, simplificando hasta obtener la ecuación normalizada que se adapte a la del algoritmo a utilizar.
- *Paso 3.* Reorganizar la ecuación normalizada para obtener los factores o coeficientes de escalado.

## 12.2. Coeficientes para sumador

El ejemplo anterior, en el que se suman dos caudales, representa el caso más fácil para obtener el valor de los coeficientes, puesto que ambos medidores tienen como límite inferior de rango 0 kg/h y además no existe término independiente en la ecuación de ingeniería.

En este apartado se contempla el caso más complejo para sumar dos medidas, con la particularidad de que cualquiera de ellas, incluso el algoritmo receptor del resultado, puede tener un rango con límite inferior distinto de cero, contemplando además término independiente en la ecuación de ingeniería.

El procedimiento para obtener los coeficientes sigue los tres pasos mencionados en el apartado anterior.

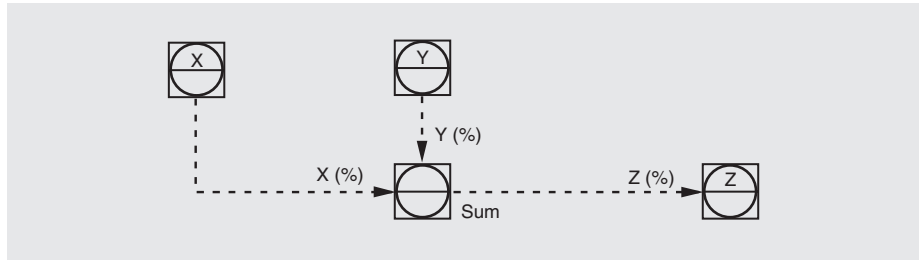


Figura 12.3

Partiendo de la Figura 12.3, la ecuación de ingeniería que se contempla es la siguiente:

$$Z_I = A * X_I + B * Y_I + C$$

La cual debe ser adaptada a la ecuación del algoritmo sumador:

$$Z_{\%} = C1 * X_{\%} + C2 * Y_{\%} + C3$$

Para efectuar el cálculo de coeficientes de escalado con carácter general para todos los casos posibles de rangos de los instrumentos, se supone que todos ellos empiezan en valores distintos de cero. Lógicamente están incluidos los casos en que alguna, o todas, las variables empiezan en cero.

La nomenclatura utilizada para el desarrollo es la siguiente:

$S_i$  = *Span* de la variable  $i$  (límite superior-límite inferior de rango).

$L_i$  = Límite inferior de rango de la variable  $i$ .

$I$  = Subíndice para indicar valores de ingeniería.

$\%$  = subíndice para indicar valores porcentuales.

Pasando los valores de la ecuación de ingeniería a valores porcentuales para igualarla a la del sumador se tiene:

$$100 * \frac{Z_I - L_z}{S_z} = 100 * C1 * \frac{X_I - L_x}{S_x} + \frac{100 * C2 * Y_I - L_y}{S_y} + C3$$

Desarrollando se obtiene:

$$\frac{Z_I}{S_z} = C1 \frac{X_I}{S_x} + C2 \frac{Y_I}{S_y} + \left( \frac{C3}{100} - C1 \frac{L_x}{S_x} - C2 \frac{L_y}{S_y} + \frac{L_z}{S_z} \right)$$

$$Z_I = C1 \frac{S_z}{S_x} X_I + C2 \frac{S_z}{S_y} Y_I + S_z \left( \frac{C3}{100} - C2 \frac{L_y}{S_y} - C1 \frac{L_x}{S_x} + \frac{L_z}{S_z} \right)$$

Igualando los valores obtenidos a la ecuación de ingeniería se obtiene:

$$A = C1 \frac{S_x}{S_z} \quad B = C2 \frac{S_z}{S_y} \quad C = S_z \left( \frac{C3}{100} - C2 \frac{L_y}{S_y} - C1 \frac{L_x}{S_x} + \frac{L_z}{S_z} \right)$$

De donde se pueden obtener los coeficientes de escalado que se han de aplicar en el algoritmo sumador.

$$C1 = A \frac{Sx}{Sz} \quad C2 = B \frac{Sy}{Sz} \quad C3 = 100 \left( \frac{C - Lz}{Sz} + C2 \frac{Ly}{Sy} + C1 \frac{Lx}{Sx} \right)$$

Sustituyendo en el cálculo de  $C3$  los valores de  $C1$  y  $C2$  obtenidos anteriormente, este coeficiente también dependerá exclusivamente de los valores de ingeniería.

$$C3 = 100 \left( \frac{C - Lz + B Ly + A Lx}{Sz} \right)$$

### 12.2.1. Enfriamiento de una línea de producto

Como ejemplo de aplicación del cálculo anterior, la Figura 12.4 representa un caso de control de diferencia de temperatura para enfriar el producto de una línea de proceso inyectando otro producto con temperatura más fría que haga las veces de refrigerante. Lógicamente los productos han de ser compatibles desde el punto de vista de composición.

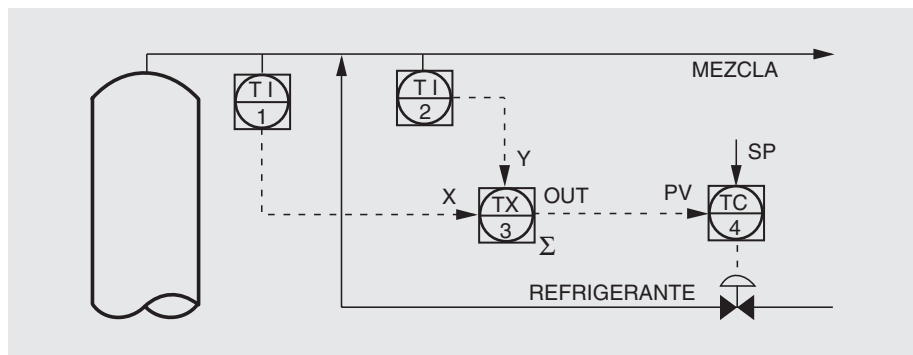


Figura 12.4

En este ejemplo, se trata de mantener una diferencia de temperatura constante en la línea de mezcla, por lo que la ecuación de ingeniería que debe realizar el sumador es la siguiente:

$$TC4.PV = A * TI1.PV + B * TI2.PV$$

donde  $A = 1,0$  y  $B = -1,0$ .

Los elementos de temperatura tienen los siguientes rangos de medida:

- Salida de la columna (TI-1): 300 a 400 °C. *Span* = 100 °C.
- Línea de mezcla (TI-2): 250 a 350 °C. *Span* = 100 °C.
- Controlador de temperatura: 20 a 80 °C. *Span* = 60 °C.

Aplicando los datos y suponiendo que la temperatura medida a la salida es de 360 °C y la temperatura de mezcla de 311 °C, la medida del controlador TC-4 será:



$$TC4.PV = 1 * 360 - 1 * 311 = 49 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

De acuerdo al desarrollo mostrado anteriormente, los coeficientes que se deben aplicar al sumador serán:

$$C1 = \frac{A Sx}{Sz} = 1,0 * \frac{100}{60} = 1,6667$$

$$C2 = B \frac{Sy}{Sz} = -1,0 * \frac{100}{60} = -1,6667$$

$$C3 = 100 \left( \frac{0 - 20 - 1,0 * 250 + 1,0 * 300}{60} \right) = 50$$

A continuación se muestra a modo de comprobación, el cálculo desarrollado por el algoritmo sumador.

Los valores porcentuales de las entradas son los siguientes:

$$X_{\%} = 100 * \frac{X_I - Lx}{Sx} = 100 * \frac{360 - 300}{100} = 60 \%$$

$$Y_{\%} = 100 * \frac{Y_I - Ly}{Sy} = 100 * \frac{311 - 250}{100} = 61 \%$$

Queda por último aplicar la ecuación que desarrolla el sumador.

$$OUT_{\%} = 1,6667 * 60 - 1,6667 * 61 + 50 = 48,333 \%$$

Al pasar esta salida del sumador al controlador se convierte automáticamente el valor porcentual a unidades de ingeniería. Como consecuencia, la medida del controlador será:

$$TC4.PV = Lz + \frac{\text{Entrada } \%}{100} * Sz = 20 + \frac{48,333}{100} * 60 = 49 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Valor que corresponde exactamente con el que suministra la ecuación de ingeniería.

### 12.2.2. Suma de combustibles

El procedimiento seguido en el primer apartado para sumar dos combustibles puede ser ahora calculado siguiendo el método general desarrollado.

Utilizando los mismos datos, el rango de medida de caudal de fuel-oil es de 0 a 800 kg/h, el de fuel-gas de 0 a 200 kg/h y el del fuel-oil equivalente es de 0 a 1.000 kg/h.

La ecuación de ingeniería que proporciona la medida del indicador *FI-4*, que corresponde a la salida del sumador *FX-3*, es la siguiente:

$$FI4.PV = 1,222 * FII.PV + FI2.PV$$

Tomando como ejemplo un caudal de 500 kg/h de fuel-oil y 150 kg/h de fuel-gas, se tendrá un caudal de fuel-oil equivalente:

$$FI4.PV = 1,222 * 150 + 500 = 683,3 \text{ kg/h}$$

De acuerdo al desarrollo mostrado anteriormente, los coeficientes que se deben aplicar al sumador serán:

$$C1 = A \frac{Sx}{Sz} = 1,222 \frac{200}{1.000} = 0,2444$$

$$C2 = B \frac{Sy}{Sz} = 1,00 \frac{800}{1.000} = 0,80$$

$$C3 = 100 \left( \frac{0 - 0 + 1,222 * 0 + 1,0 * 0}{1.000} \right) = 0$$

Los valores porcentuales de las entradas del ejemplo son los siguientes:

$$X_{\%} = 100 * \frac{150 - 0}{200} = 75 \%$$

$$Y_{\%} = 100 * \frac{500 - 0}{800} = 62,5 \%$$

Queda por último aplicar la ecuación que desarrolla el sumador.

$$OUT_{\%} = 0,2444 * 75 + 0,80 * 62,5 = 68,33 \%$$

Al pasar esta salida del sumador al controlador se convierte automáticamente el valor porcentual a unidades de ingeniería. Como consecuencia, la medida del indicador será:

$$FI4.PV = \frac{\text{Entrada } \%}{100} * Sz = \frac{68,33}{100} * 1.000 = 683,3 \text{ kg/h}$$

Valor que corresponde exactamente con el que suministra la ecuación de ingeniería.

### 12.3. Coeficientes para multiplicador

En este apartado se contempla la multiplicación de dos medidas, con la particularidad de que cualquiera de ellas, o el algoritmo receptor del resultado, puede tener un rango con límite inferior distinto de cero, contemplando término independiente en la ecuación de ingeniería.

Igual que para el sumador, el procedimiento para obtener los coeficientes sigue los tres pasos mencionados anteriormente.

Partiendo de la Figura 12.5, la ecuación de ingeniería que se contempla es la siguiente:

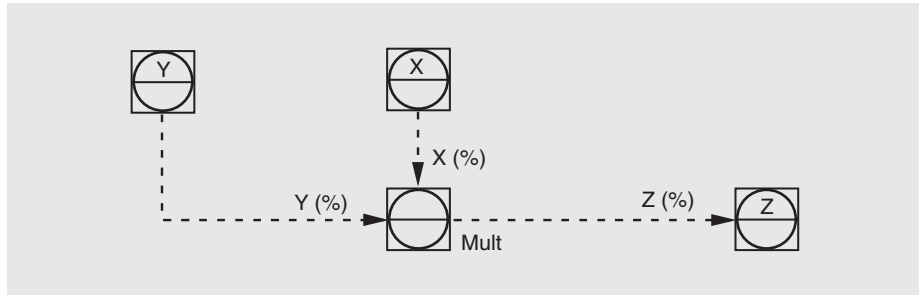


Figura 12.5

$$Z_I = A * X_I * Y_I + B$$

La cual debe ser adaptada a la ecuación del algoritmo multiplicador:

$$Z_{\%} = C * (X_{\%} + C1) * (Y_{\%} + C2) + D$$

Para efectuar el cálculo de coeficientes de escalado, con carácter general para todos los casos posibles de rangos de los instrumentos, se supone que todos empiezan en valores distintos de cero. Lógicamente están incluidos los casos en que alguna, o todas, las variables empiezan en cero. La nomenclatura utilizada para el desarrollo es la misma que en el caso del sumador.

Pasando los valores de la ecuación de ingeniería a valores porcentuales para igualarla a la del multiplicador se tiene:

$$100 * \frac{Z_I - Lz}{Sz} = C \left( 100 * \frac{X_I - Lx}{Sx} + C1 \right) \left( 100 * \frac{Y_I - Ly}{Sy} + C2 \right) + D$$

Desarrollando se obtiene:

$$\frac{Z_I}{Sz} = 100 * C * \left( \frac{X_I}{Sx} - \frac{Lx}{Sx} + \frac{C1}{100} \right) \left( \frac{Y_I}{Sy} - \frac{Ly}{Sy} + \frac{C2}{100} \right) + \frac{D}{100} + \frac{Lz}{Sz}$$

Simplificando se llega a que:

$$C * \frac{100 * Sz}{Sx * Sy} = A$$

$$\frac{100 * C * Sz}{Sy} \left( \frac{C1}{100} - \frac{Lx}{Sx} \right) = 0$$

$$\frac{100 * C * Sz}{Sx} \left( \frac{C2}{100} - \frac{Ly}{Sy} \right) = 0$$

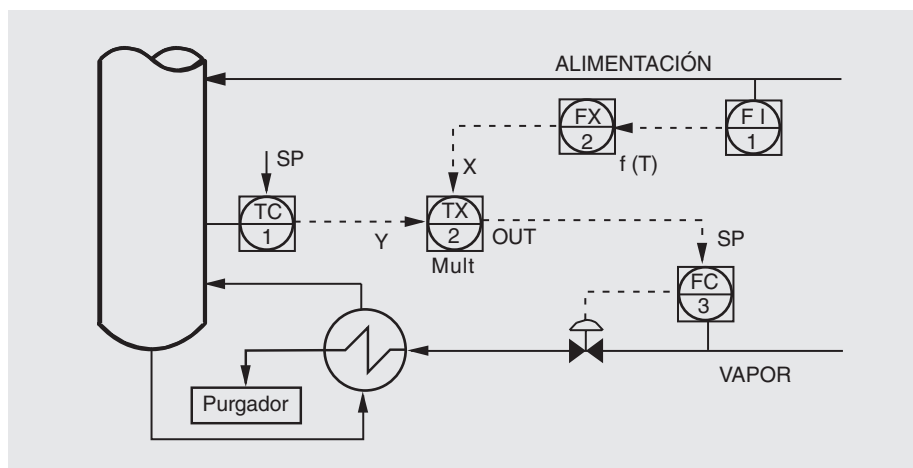
$$Lz + \frac{D * Sz}{100} = B$$

De donde se pueden obtener los coeficientes de escalado que se han de aplicar en el algoritmo multiplicador.

$$C = A \frac{S_x * S_y}{100 * S_z} \quad CI = 100 \frac{Lx}{S_x} \quad C2 = 100 \frac{Ly}{S_y} \quad D = 100 B - \frac{B - Lz}{S_z}$$

### 12.3.1. *Feedforward* fondo columna destilación

Como ejemplo de aplicación del cálculo anterior, la Figura 12.6 muestra el control de calentamiento de fondo de una columna de destilación aplicando un sistema de adelanto (*feedforward*) para compensar las variaciones en el caudal de alimentación a la misma.

**Figura 12.6**

Puesto que solo se trata de ver el desarrollo del cálculo efectuado por el multiplicador, no se contempla la funcionalidad del elemento compensador de tiempo, por otra parte explicado en otro capítulo.

El controlador de temperatura modifica el punto de consigna del controlador de caudal, con la particularidad de que en un cierto rango de relación entre vapor y caudal de alimentación se supone un comportamiento lineal, por lo que se cumple la siguiente ecuación de ingeniería:

$$\frac{\text{Vapor (V)}}{\text{Alimentación (F)}} * \text{Alimentación (F)} = \text{Vapor (V)}$$

El sistema de control está diseñado para que el 0 % de salida del controlador de temperatura equivalga a 0,4 de relación V/F, mientras que el 100 % de salida equivalga a 0,8 de relación. Este procedimiento impide que el caudal de vapor llegue a 0 ó 100 %, que sería el comportamiento de un control en cascada entre temperatura y caudal, quedando limitado a los valores de relación mencionados.

Los valores de relación son totalmente independientes de la temperatura que se desea controlar. Como se sabe, la salida de un controlador es flotante, por lo que no depende de los valores absolutos de temperatura sino de la acción correctora que proporciona la salida.

El caudal de alimentación tiene un rango comprendido entre 0 y 100 m<sup>3</sup>/h y el de vapor entre 0 y 60 m<sup>3</sup>/h.

Como consecuencia, la ecuación de ingeniería que se ha de cumplir es:

$$FC3.SP = TC1.OUT * FII.PV$$

Para comprobar el funcionamiento se supone un ejemplo en el que está pasando un caudal de alimentación de 65 m<sup>3</sup>/h, manteniendo una relación de 0,5. Por tanto, el caudal de vapor será:

$$FC3.SP = 0,5 * 65 = 32,5 \text{ m}^3/\text{h de vapor}$$

El controlador de temperatura tendrá un punto de consigna que hay que mantener, independiente de la relación V/F, de forma que si la medida aumenta o disminuye respecto a ese punto de consigna disminuirá o aumentará respectivamente su salida, la cual es directamente proporcional a la relación, como se ha mencionado anteriormente.

Una vez fijados los conceptos, los parámetros necesarios para el cálculo son:

- Rango de la variable X: 0 a 80.  $Span (Sx) = 80$ .
- Rango de la variable Y: 0,4 a 0,8.  $Span (Sy) = 0,4$ .
- Rango de la variable Z: 0 a 60.  $Span (Sz) = 60$ .
- Límite inferior de la variable Y: 0,4.  $(Ly) = 0,4$

A partir de los cuales se pueden calcular los coeficientes de la ecuación del multiplicador.

$$C = 1,0 * \frac{80 * 0,4}{100 * 60} = 53,33 * 10^{-4} \quad CI = 100 \frac{0}{80} = 0$$

$$C2 = 100 \frac{0,4}{0,4} = 100 \quad D = 100 \frac{0 - 0}{60} = 0$$

Los valores porcentuales de las entradas del ejemplo son los siguientes:

$$X_{\%} = 100 * \frac{65 - 0}{80} = 81,25 \%$$

$$Y_{\%} = 100 * \frac{0,5 - 0,4}{0,4} = 25 \%$$

Con objeto de comprobar el funcionamiento, queda por último aplicar la ecuación que desarrolla el multiplicador.

$$OUT_{\%} = 53,33 * 10^{-4} * (81,25 + 0) * (25 + 100) + 0 = 54,16 \%$$

Al pasar esta salida del multiplicador al controlador de caudal de vapor se convierte automáticamente el valor porcentual a unidades de ingeniería. Como consecuencia, la medida del controlador será:

$$FC3.SP = \frac{\text{Entrada } \%}{100} * S_z = \frac{54,16}{100} * 60 = 32,5 \text{ m}^3/\text{h}$$

## 12.4. Coeficientes para divisor

En este apartado se muestra el cálculo de coeficientes de escalado de un divisor. Prácticamente es una repetición del método seguido hasta ahora, sobre todo si se compara al multiplicador.

Igual que en los casos anteriores, se contempla la posibilidad de que alguno o varios de los rangos de los instrumentos empiecen en valor distinto de cero.

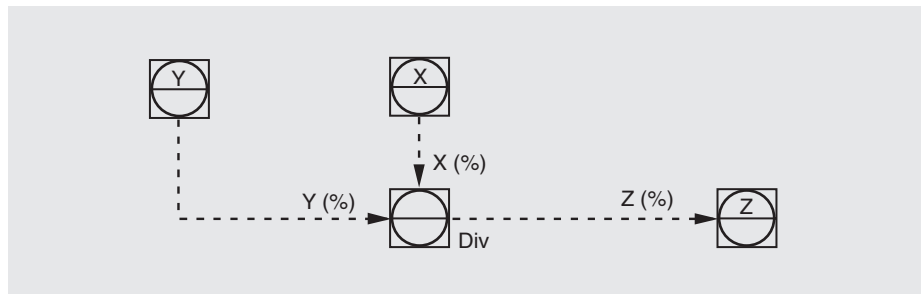


Figura 12.7

Partiendo de la Figura 12.7, la ecuación de ingeniería que se contempla es la siguiente:

$$Z_I = A * \frac{Y_I}{X_I} + B$$

La cual debe ser adaptada a la ecuación del algoritmo divisor:

$$Z_{\%} = C * \left( \frac{Y_{\%} + C2}{X_{\%} + C1} \right) + D$$

Pasando los valores de la ecuación de ingeniería a valores porcentuales para igualarla a la del divisor se tiene:

$$100 * \frac{Z_I - L_z}{S_z} = C * \frac{100 * \frac{Y_I - L_y}{S_y} + C2}{100 * \frac{X_I - L_x}{S_x} + C1} + D$$

Desarrollando y simplificando de la misma manera que en los casos anteriores se obtiene:

$$C * \frac{Sx * Sz}{100 * Sy} = A$$

$$Lx - CI * \frac{Sx}{100} = 0$$

$$Ly - C2 * \frac{Sy}{100} = 0$$

$$Lz + \frac{D * Sz}{100} = B$$

De donde se pueden obtener los coeficientes de escalado que se han de aplicar en el algoritmo divisor.

$$C = 100 \frac{A * Sy}{Sx * Sz} \quad CI = 100 \frac{Lx}{Sx} \quad C2 = 100 \frac{Ly}{Sy} \quad D = 100 \frac{B - Lz}{Sz}$$

### 12.4.1. Control de relación

Aunque en el cálculo de coeficientes se contemplan las diferentes posibilidades que ofrece este algoritmo, realmente no es frecuente encontrar casos prácticos que tengan rangos con valores distintos de cero como límite inferior en los elementos de medida, aunque sí puede darse en el algoritmo receptor del cálculo.

La Figura 12.8 muestra un ejemplo típico de relación de caudales para obtener una mezcla, en la que partiendo de un caudal de 25 m<sup>3</sup>/h del componente 1 se quiere mantener la relación de 2 entre ambos componentes, luego el valor del componente 2 será 50 m<sup>3</sup>/h.

Como consecuencia, la ecuación de ingeniería que se ha de cumplir es:

$$RC1.PV = \frac{FI2.PV}{FI1.PV}$$

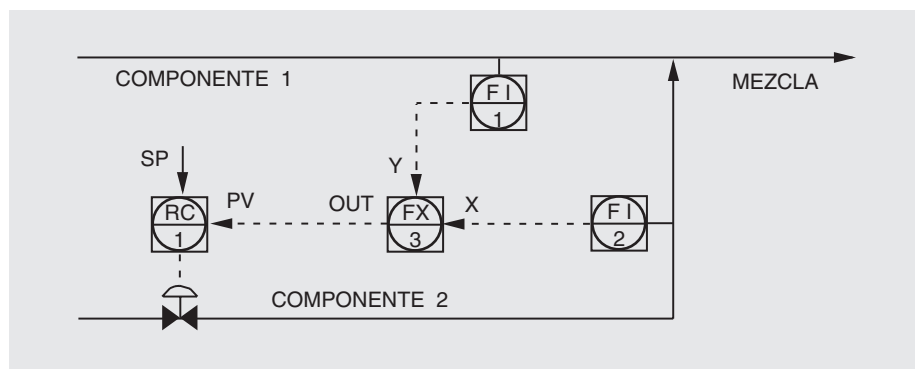


Figura 12.8

Aplicando los datos del ejemplo, la relación entre ambos componentes será:

$$RCI.PV = \frac{50 \text{ m}^3/\text{h}}{25 \text{ m}^3/\text{h}} = 2$$

El controlador de relación tendrá un punto de consigna que hay que mantener, de forma que si la medida aumenta o disminuye respecto a ese punto de consigna disminuirá o aumentará respectivamente su salida para modificar el caudal de paso del componente 2.

Una vez fijados los conceptos, los parámetros necesarios para el cálculo son:

- Rango de la variable X: 0 a 40.  $Span (Sx) = 40.$
- Rango de la variable Y: 0 a 75.  $Span (Sy) = 75.$
- Rango de la variable Z: 1 a 3.  $Span (Sz) = 2.$
- Límite inferior de la variable Z: 1.  $(Lz) = 1.$

A partir de los cuales se pueden calcular los coeficientes de la ecuación del divisor.

$$C = 100 \frac{75}{40 * 2} = 93,75 \quad CI = 100 \frac{0}{40} = 0$$

$$C2 = 100 \frac{0}{75} = 0 \quad D = 100 \frac{0 - 1}{2} = -50$$

Los valores porcentuales de las entradas del ejemplo son los siguientes:

$$X_{\%} = 100 * \frac{25}{40} = 62,50 \%$$

$$Y_{\%} = 100 * \frac{50}{75} = 66,667 \%$$

Queda por último aplicar la ecuación que desarrolla el divisor para comprobar su funcionamiento.

$$OUT_{\%} = 93,75 \frac{66,667}{62,50} - 50 = 50$$

Al pasar esta salida del divisor al controlador de relación se convierte automáticamente el valor porcentual a unidades de ingeniería. Como consecuencia, la medida del controlador de relación será:

$$RCI.PV = Lz + \frac{\text{Entrada } \%}{100} * Sz = 1 + \frac{50}{100} * 2 = 2$$