



SBA
PRESS

JULIO ELIAS NORMEY-RICO
MARCELO MENEZES MORATO

INTRODUCCIÓN AL CONTROL DE PROCESOS

Blucher



sociedade brasileira de
AUTOMÁTICA

Julio Elias Normey-Rico
Marcelo Menezes Morato

Introducción al control de procesos

Introducción al control de procesos

© 2022 Julio Elias Normey-Rico y Marcelo Menezes Morato

Editora Edgard Blücher Ltda.

Publisher Edgard Blücher

Editor Eduardo Blücher

Coordenação editorial Jonatas Eliakim

Produção editorial Bárbara Waida

Diagramação Autores

Capa Leandro Cunha

Imagem da capa iStockphoto

Editora Blucher

Rua Pedroso Alvarenga, 1245, 4º andar

CEP 04531-934 – São Paulo – SP – Brasil

Tel.: 55 11 3078-5366

contato@blucher.com.br

www.blucher.com.br

É proibida a reprodução total ou parcial por quaisquer meios sem autorização escrita da editora. Todos os direitos reservados pela Editora Edgard Blücher Ltda.

Datos de catalogación internacional en publicación (CIP)

Angélica Ilacqua CRB-8/7057

Normey-Rico, Julio Elias

Introducción al control de procesos / Julio Elias Normey-Rico, Marcelo Menezes Morato. – São Paulo : Blucher, 2022.

728 p. : il. (Recopilación SBA Press)

Bibliografía

ISBN 978-65-5506-482-7 (impreso)

ISBN 978-65-5506-478-0 (electrónico)

Título original: Introdução ao controle de processos

1. Control de procesos I. Título II. Morato, Marcelo Menezes III. Serie

22-2852

CDD 681.7

Las puntuaciones de catálogo sistemático:

1. Control de procesos

Contenido

1. Introducción	19
 I Procesos y sistemas	 23
2. Procesos	25
2.1. Introducción	25
2.1.1. Diagrama de bloques	29
2.2. ¿Control de procesos?	33
2.3. Comprendiendo el control de procesos	36
2.3.1. Ejemplos de procesos y sus variables	40
2.3.2. Procesos monovariantes y multivariantes	44
2.3.3. Sistemas de control en lazo cerrado manual y automático	45
2.4. Comentarios finales	51
2.5. Lectura complementaria	52
 3. Señales y sistemas	 57
3.1. Señales, sistemas y modelos	57
3.2. Modelos y diagramas	64
3.3. Señales: representación y uso	70
3.3.1. Señal tipo escalón	73
3.3.2. Señal tipo rampa	74
3.3.3. Señal impulso unitario	78

3.3.4.	Señales sinusoidales	80
3.3.5.	Señal de potenciación discreta	80
3.3.6.	Señal exponencial	81
3.4.	Señales: energía	85
3.5.	Señales: operaciones y transformaciones	88
3.5.1.	Muestreo	90
3.5.2.	Interpolación	93
3.5.3.	Procesamiento digital	96
3.6.	Comentarios finales	99
3.7.	Lectura complementaria	100
4.	Propiedades de sistemas	105
4.1.	Clasificación de sistemas	105
4.2.	Sistemas continuos y discretos	106
4.3.	Sistemas causales y no causales	109
4.4.	Sistemas invariantes y variantes en el tiempo	111
4.5.	Sistemas lineales	116
4.6.	Estabilidad de sistemas	124
4.7.	Comentarios finales	133
4.8.	Lectura complementaria	133
II	Modelos y respuestas en el tiempo	139
5.	Modelado	141
5.1.	Principios básicos del modelado	141
5.2.	Ejemplos de modelado de procesos continuos	144
5.3.	Ejemplos de modelado de sistemas discretos	151
5.4.	Análisis de procesos: modelos estáticos y dinámicos	155
5.4.1.	Régimen transitorio y régimen permanente	167
5.5.	Simulación de procesos	168

5.6.	Ajuste de modelos a partir de datos experimentales	175
5.7.	Modelos lineales aproximados de sistemas no lineales	178
5.7.1.	Un ejemplo motivador	179
5.7.2.	Aproximación de Taylor de primer orden para mode- los dinámicos	190
5.7.3.	Caso discreto	192
5.8.	Comentarios finales	197
5.9.	Lectura complementaria	197
6.	Respuesta en el tiempo de sistemas lineales de primer orden	215
6.1.	Abordaje intuitivo	215
6.2.	Sistemas continuos	226
6.2.1.	Ecuación diferencial ordinaria	226
6.2.2.	Solución de la EDO: Casos estable e inestable	227
6.2.3.	Solución de la EDO: caso integrador	236
6.3.	Sistemas discretos	238
6.3.1.	Solución de la ED	239
6.3.2.	Análisis de la solución de la ED: casos estable, ines- table e integrador	242
6.4.	Respuesta de los sistemas muestreados	246
6.5.	Comentarios finales	260
6.6.	Lectura complementaria	261
7.	Cerrando el lazo: control por realimentación de salida	273
7.1.	Los objetivos del control de procesos	273
7.2.	Los sistemas de control (en el nivel 1)	280
7.3.	Control de lazo abierto y lazo cerrado	283
7.3.1.	Requisitos de operación	288
7.3.2.	Modelos aproximados con retardo	297
7.3.3.	Aspectos prácticos	304
7.4.	Estrategias clásicas de control en lazo cerrado	306

7.5. Comentarios finales	307
7.6. Lectura complementaria	307

III Control de procesos **321**

8. Control *on-off* **323**

8.1. Idea básica	323
8.2. Implementación	327
8.2.1. Procesos con ganancia positiva	328
8.2.2. Procesos con ganancia negativa	329
8.2.3. Implementación práctica con relés	329
8.2.4. Control <i>on-off</i> con relés	331
8.3. Respuesta de regulación <i>on-off</i>	334
8.3.1. Caso continuo	334
8.3.2. Caso discreto	343
8.4. Análisis de casos con perturbaciones	345
8.5. Comentarios finales	351

9. Control proporcional (P) **369**

9.1. Idea básica	369
9.2. Implementación del control proporcional	371
9.2.1. Implementación electrónica analógica y digital	376
9.3. Algunos ejemplos intuitivos	378
9.4. La solución en lazo cerrado: plantas estables.	382
9.4.1. Caso continuo	383
9.4.2. Caso discreto	386
9.5. Procesos inestables e integradores	397
9.5.1. Procesos continuos inestables	397
9.5.2. Procesos continuos integradores	398
9.5.3. Procesos discretos	399

9.6. El signo BIAS	403
9.6.1. Control de tanque pulmón	410
9.6.2. BIAS automático	416
9.7. Comentarios finales	419
10. Control proporcional-integral (PI)	437
10.1. Idea básica	437
10.2. Acción integral: un ejemplo motivador	438
10.3. Control integral	445
10.3.1. Control integral y régimen permanente	446
10.3.2. Ajuste del control integral y régimen transitorio . . .	450
10.3.3. Control proporcional-integral: suma ponderada de ac-	
ciones	454
10.3.4. La acción I: ¿un BIAS automático?	458
10.4. Implementación del control PI	461
10.4.1. Implementación analógica	462
10.4.2. Implementación digital	466
10.5. Ajuste del controlador proporcional-integral	472
10.5.1. Ajustes básicos para procesos sin retardo	474
10.5.2. Método de ajuste de Ziegler-Nichols	477
10.5.3. Método de ajuste de Skogestad	478
10.6. Comentarios finales	480
11. Control PI: aspectos prácticos	499
11.1. Estudio de caso: piloto automático de un automóvil para con-	
trolar la velocidad	499
11.2. Estudio de caso: control de un fermentador de etanol	504
11.3. Control PI con ponderación de la referencia	509
11.4. Modos de funcionamiento: manual y automático	516
11.5. Control PI con saturación de acción de control	518
11.5.1. El efecto de la acumulación de la acción integral . . .	520

11.5.2. <i>Anti-windup</i> digital	527
11.5.3. <i>Anti-windup</i> analógico	533
11.6. Comentarios finales	536
12. Control proporcional-integral-derivativo (PID)	555
12.1. La acción derivativa: prediciendo el futuro	556
12.2. Controladores PID y sus configuraciones	560
12.3. Sintonización de controladores PID	571
12.3.1. Método de ajuste de Ziegler-Nichols de lazo abierto	571
12.3.2. Método de ajuste de Ziegler-Nichols de lazo cerrado	574
12.3.3. Método de ajuste PID-IMC	577
12.4. Implementación de controladores PID	580
12.4.1. Implementación analógica de controladores PID	580
12.4.2. Implementación digital de controladores PID	583
12.5. Medición ruidosa	585
12.5.1. El efecto del ruido en la medición	587
12.5.2. Filtro de medición	593
12.5.3. Implementación de filtro de medición	600
12.5.4. El uso de filtros de ruido en el control PID	603
12.6. Control anticipativo	605
12.7. Comentarios finales	616
13. Control avanzado: conceptos básicos de optimización y robustez	635
13.1. Planificación del proceso de producción	635
13.2. Optimización	637
13.3. Incertidumbre en el modelado	644
13.3.1. Control proporcional robusto	649
13.3.2. Robustez de la acción integral	653
13.4. Control lineal de parámetros variables (LPV)	657
13.5. Comentarios finales	661
13.6. Lectura complementaria	662

A. Problemas y soluciones	669
A.1. Problema 1	669
A.1.1. Resolución	670
A.2. Problema 2	674
A.2.1. Resolución	676
A.3. Problema 3	679
A.3.1. Resolución	681
A.4. Problema 4	685
A.4.1. Resolución	687
A.5. Problema 5	691
A.5.1. Resolución	693
B. Kit experimental: control de velocidad de un motor de CC	699
B.1. Kit experimental	699
B.2. Modulación PWM	701
B.3. Circuito electrónico	704
B.4. Tutorial de comunicación con Arduino	706
C. Simuladores de procesos	709
Lista de figuras	713

Capítulo 1

Introducción

Este libro tiene como objetivo principal presentar a los estudiantes de ingeniería (y de áreas afines) algunos problemas de control simples normalmente encontrados en la industria de procesos, como también muchas de las soluciones implementadas para resolverlos en la práctica.

El libro también aborda aspectos técnicos de los procesos industriales de producción, tales como cuestiones relacionadas a los sistemas de medición, de actuación y de control. Para tal, diversos casos reales son usados para motivar y embazar las herramientas de control y sus respectivos desarrollos matemáticos. Algunos ejemplos prácticos vistos a lo largo de este libro provienen de la industria de la caña de azúcar, de sistemas de energía solar, del sector de vehículos autónomos y de la industria de petróleo y gas, temas de gran importancia socio-económica.

A lo largo del texto, los conceptos básicos de Control de Procesos serán detallados, abordando las principales metodologías básicas de control realimentado y también algunos casos donde se aplicaran técnicas de control avanzado.

Es importante resaltar que todo desarrollo teórico presentado en este libro sigue un abordaje intuitiva, que utiliza conceptos y herramientas básicas de la física y del cálculo. El libro es orientado para estudiantes de

ingeniería que poseen conocimientos básicos de matemática (como funciones, derivadas, integrales, ecuaciones diferenciales ordinarias y series) y de física (mecánica, termodinámica, hidráulica y leyes de conservación), pero no son necesarios conocimientos de transformadas de Laplace o Fourier. El material disponible en este libro también puede ser utilizado en cursos técnicos de ingeniería de control y automatización y en áreas afines.

Este libro también presenta un tutorial para el montaje de un prototipo para ensayos experimentales de técnicas de control. Este prototipo utiliza un motor-generator de corriente continua, cuya velocidad es controlada por medio de una señal de tensión accionada por un microcontrolador Arduino. Con el prototipo, diversos conceptos teóricos y métodos de control pueden ser probados.

Los temas y apartados de cada capítulo son divididos en temas básicos y avanzados. Los temas avanzados (marcados en azul) utilizan una matemática mas compleja y tienen mayor rigor y formalismos en las demostraciones. Los lectores y lectoras que no deseen estudiar los temas avanzados pueden continuar la lectura saltándolos, sin perder continuidad en el desarrollo de las ideas.

Este libro está organizado de la siguiente forma:

- Los Capítulos 2 y 3 introducen los primeros conceptos sobre procesos físicos, señales y sistemas. Las definiciones de actuación, medición, variable de control y de proceso, tal como los conceptos de interpolación y muestreo, son presentados y ejemplificados con casos prácticos.
- Los Capítulos 4, 5 y 6 presentan las herramientas matemáticas para análisis de sistemas físicos y como estos pueden ser representados a través de Ecuaciones Diferenciales o Ecuaciones en Diferencias. En estos Capítulos, los conceptos de linealidad, linealización y propiedades generales de sistemas son discutidos, siempre usando ejemplos intuitivos.

- El Capítulo 7 presenta un panorama general de como se comportan los sistemas cuando son colocados bajo la acción de controladores con realimentación dinámica de salida.
- En seguida, los Capítulos 8, 9, 10, 11 y 12 presentan, las estrategias de control del tipo *On-Off* (Todo-Nada), Proporcional (P), Proporcional-Integral (PI) y Proporcional-Integral-Derivativo (PID). En el Capítulo 12 se estudian las ideas básicas de los controladores anticipatorios (*feedforward*). Finalmente, en el Capítulo 13, algunas nociones básicas de optimización y control robusto son discutidas para motivar al estudiante en temas más avanzados.

Para la revisión de los contenidos presentados, al final de cada capítulo, incluimos listas de ejercicios y de problemas, además de algunos problemas resueltos. En las listas, proponemos ejercicios con foco directo en los temas del capítulo correspondiente. En los problemas, buscamos presentar casos de estudio que integran el contenido de varios capítulos. Destacamos también que, a partir del Capítulo 5, incluimos actividades experimentales que son propuestas para ser desarrolladas en el prototipo experimental propuesto. También, al final de gran parte de los capítulos, presentamos un apartado con lecturas recomendadas, para que el lector pueda profundizar sus conocimientos en los temas abordados en cada capítulo.

Capítulo 2

Procesos

El asunto principal de este libro es el control de procesos, área de estudio de gran importancia en el contexto de la ingeniería. Para poder avanzar en el estudio de los problemas asociados al control de procesos, es necesario, primeramente, presentar los conceptos básicos de sistemas y responder a preguntas como:

- ¿Qué es y cómo se define un proceso en la ingeniería de control?
- ¿Cuáles son las etapas del proyecto de un sistema de control de un proceso?

Para responder a estas preguntas, en este capítulo estudiamos el funcionamiento de procesos e introducimos algunas definiciones y conceptos importantes para su entendimiento, como, por ejemplo, lo que son variables de control, variables controladas, perturbaciones, etc.

2.1. Introducción

Definición 1 *Proceso*

*En el contexto de la ingeniería, un **proceso** es definido como un sistema*

que transforma o modifica las propiedades físicas, químicas o biológicas de un material o elemento, pudiendo convertirlo en un nuevo producto.

Varias pequeñas tareas cotidianas son ejemplos de procesos simples. A continuación serán presentados algunos de estos ejemplos.

Ejemplo 1 *La Figura 2.1 ilustra un proceso simple de nuestro día a día: el acto de calentar agua en una cocina a gas. En este proceso, al manipular o regular la cantidad de calor que se produce en el quemador conseguimos modificar una propiedad física (en este caso la temperatura) de la materia prima (que para este ejemplo sería el agua). Se nota, empíricamente, una relación causa-efecto; la temperatura del agua aumentará conforme la cantidad de calor entregada por el quemador. Observamos, generalmente, que la variación de la propiedad física del material es una función de la intensidad de actuación sobre el proceso que produce ese material. En este proceso estamos usando la energía producida por la combustión del gas (que es una reacción química) para cambiar la temperatura del agua.*

Ejemplo 2 *Otro ejemplo de un proceso simple, es la variación de la velocidad de las aspas de un ventilador cuando accionamos un potenciómetro que modifica la potencia eléctrica del aparato (ilustrado en la Figura 2.2). En este caso, tenemos un proceso en el cual la energía eléctrica es transformada en energía mecánica. Al aumentar la potencia eléctrica aplicada se consigue que las aspas del ventilador se muevan a mayor velocidad.*

A pesar de los ejemplos anteriores ser de áreas diferentes, desde el punto de vista del entendimiento del concepto de procesos, ellos tienen varias características en común. La primera es que existe una relación causa efecto entre una manipulación realizada sobre el proceso (que más tarde definiremos como variable manipulada del proceso) y la propiedad del material que se está produciendo o de una característica del proceso que se desea modificar (que definiremos en las próximas secciones como variable controlada

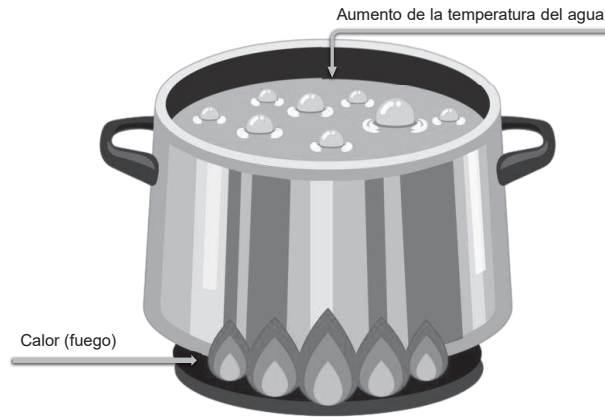


Figura 2.1 – Sistema de calentamiento de agua.

o de proceso). En el caso del quemador de gas, manipulamos la válvula de gas con el objetivo de aumentar la temperatura del agua. En el caso del ventilador, nuestro objetivo de modificar la posición del potenciómetro que ajusta la potencia eléctrica para variar la velocidad del ventilador. La segunda característica en común es que en todo proceso las variaciones de las grandezas que queremos cambiar (temperatura y velocidad en los ejemplos anteriores) se dan en la práctica de forma gradual a lo largo del tiempo, con una cierta dinámica, que estudiaremos más adelante en este libro. Finalmente, una tercera característica es que precisamos de elementos en el proceso que permitan nuestra interacción con él: un dispositivo que nos permita actuar en el proceso y otro que nos permita percibir los cambios que ocurren por causa de nuestra actuación. Estudiaremos con más detalles estos conceptos en este capítulo, pero antes mostraremos una forma gráfica simple de representación de los procesos.

Como visto en los ejemplos anteriores, la descripción de un proceso puede ser realizada de forma textual. Pero en la práctica de ingeniería, es normal

utilizar representaciones gráficas de los procesos, de forma que un lector comprenda, rápida y directamente, las relaciones entre las manipulaciones que realizamos en el proceso y los efectos producidos por ellas.

Por ejemplo, el proceso del ventilador podría ser representado gráficamente de forma simple como se muestra en la Figura 2.2. En esta representación, podemos observar directamente la relación causa efecto entre las diferentes grandezas involucradas en este proceso (en el caso, la posición del potenciómetro y la velocidad) y la existencia de una transformación que traduce la posición del potenciómetro en una cierta velocidad de las aspas del ventilador.

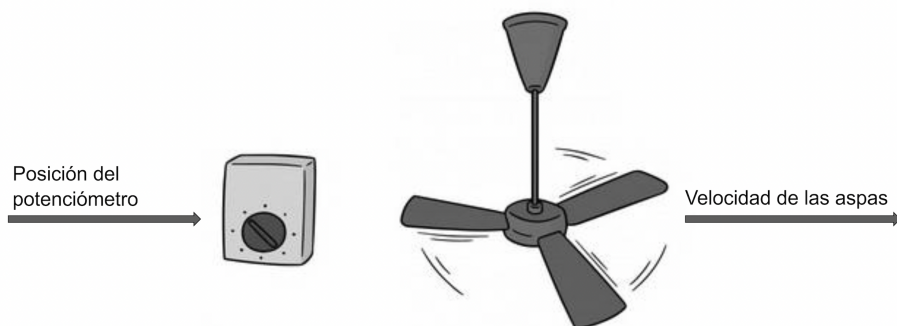


Figura 2.2 – Ventilador con control de velocidad.

En el contexto de ingeniería de control, la principal representación para las transformaciones y relaciones de causa y efecto entre variables es denominada de “Diagrama de bloques”. Por ser una herramienta muy importante estudiaremos con más detalles algunas de sus propiedades en el próximo apartado.

2.1.1. Diagrama de bloques

Un diagrama de bloques es un diagrama de flujo usado para caracterizar y detallar el funcionamiento de procesos, es una herramienta muy útil empleada para representar visualmente procesos reales. Con ella es posible, de manera simple y visual, demostrar las etapas y los procedimientos intermediarios necesarios para, por ejemplo, transformar una dada materia prima en producto final, inclusive en procesos más complejos que los que presentamos en el apartado anterior.

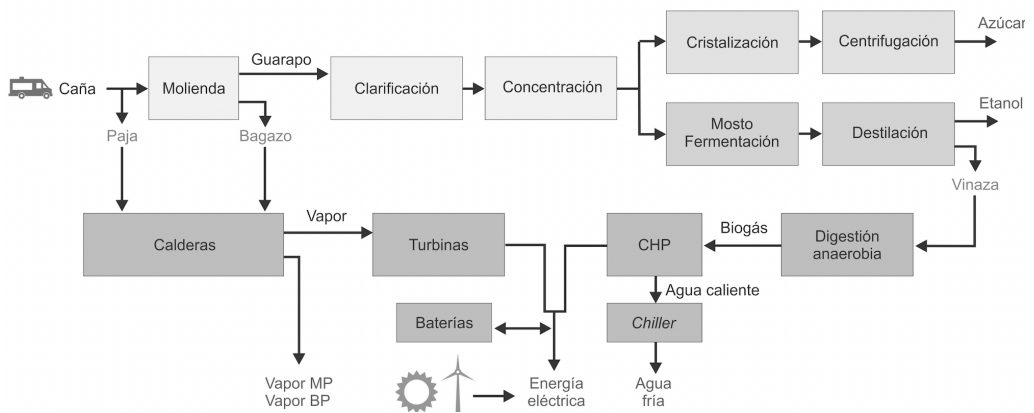


Figura 2.3 – Producción de azúcar, etanol y energía en la industria de la caña de azúcar.

Ejemplo 3 En la Figura 2.3, presentamos un diagrama de bloques que representa las etapas fundamentales de un proceso de producción de azúcar y bioetanol a partir de la caña de azúcar. El procesamiento empieza con la molienda de la caña de azúcar, en un proceso similar al usado en los kioscos de jugo de caña. Los subproductos de este proceso son el guarapo, que es un caldo azucarado, y el bagazo de caña, que consiste en las fibras de la caña de azúcar que fueron molidas. Con estos dos subproductos, el procesamiento continúa en la fábrica (en el ingenio de caña, como normalmente se denomina en la industria). El guarapo pasa, entonces, por un proceso de clarificación, tratamiento químico empleado para dejar el producto de color

blanco; y la concentración (retirada del agua por vaporización). El producto resultante (que se puede comparar con la melaza de caña) toma dos caminos posibles: o se cristaliza y se centrifuga para producir azúcar, o se fermenta y se destila para producir etanol. El bagazo de caña de azúcar, junto con la paja (desechos orgánicos como hojas y puntas de caña, traídos de los campos), se quema en calderas para producir vapor. Este vapor se utiliza, en una pequeña parte, para la propia planta (por ejemplo, para calentar los evaporadores) y en grandes volúmenes, para la producción de energía eléctrica en turbinas de vapor, que se vende a la distribuidora de energía y/o se utiliza en la propia planta. Además, otro subproducto de la fábrica es la vinaza, que es el residuo no alcohólico de la destilación, empleado en digestores para producir biogás. Este biocombustible se puede utilizar para producir calor y electricidad en máquinas específicas para este propósito, llamadas CHP (del inglés, Combined Heat and Power). El destino de la energía eléctrica de la CHP es también designado a la venta y al consumo local; el calor puede tener varios usos prácticos. Por ejemplo, puede usarse en Chillers (resfriadores), que son dispositivos capaces de generar agua fría a partir de agua caliente. Esta agua fría es usada para enfriar algunos fluidos dentro del proceso.

Como vemos, se trata de un proceso complejo, cuya materia prima, la caña de azúcar, se utiliza de forma íntegra: tanto en lo que podría considerarse como producto principal, el jugo, como en los residuos del proceso de transformación (paja, bagazo y vinaza), que se utilizan para generar electricidad, agua fría y vapor (que sirven para mantener en funcionamiento el proceso de clarificación, trituración y concentración). Cada uno de estos pasos (bloques en el diagrama) de la transformación de la caña de azúcar son procesos que modifican las propiedades físicas y químicas de los productos. El conjunto de todos los procesos conectados se suele denominar planta, término que a veces también se utiliza como sinónimo de proceso.

El nivel de detalle que se puede incluir en estos diagramas de bloques

puede variar según el sector o la aplicación de la ingeniería (informática, producción, etc.).

Ejemplo 4 *Un ejemplo de aplicación industrial para la generación de energía renovable se representa con el diagrama de bloques mostrado en la Figura 2.4. En esta figura podemos ver cómo el proceso transforma la biomasa y la radiación solar para generar la energía eléctrica suministrada a la red externa. La biomasa recibida se almacena y luego se lleva a una caldera para producir vapor, el cual se convierte en energía eléctrica en un par turbina-generator que opera a una frecuencia de 60 Hz. Por otro lado, la radiación solar se convierte en energía eléctrica mediante paneles fotovoltaicos que puede ser enviada a la red después de pasar por una etapa de conversión a la frecuencia de la red. La energía producida en estos procesos puede inyectarse directamente a la red o acumularse en baterías para ser utilizada en otros momentos distintos al de la producción, siempre con la transformación de corriente alterna a continua, o viceversa.*

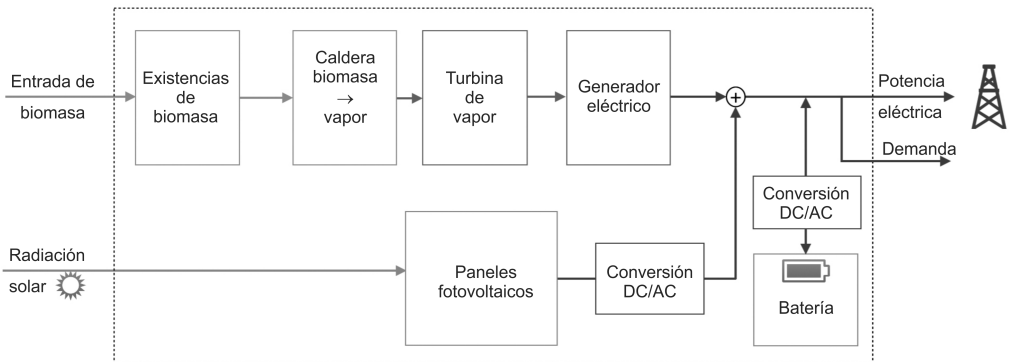


Figura 2.4 – Microred: proceso de generación de energía renovable.

Ejemplo 5 *La Figura 2.5 presenta el ejemplo de un diagrama de bloques un poco más general, en el cual solo se modelan los intercambios de energía entre el proceso de conversión y almacenamiento, sin detallar qué tipo de proceso se está representando. En este ejemplo, no son detallados los tipos de subprocesos representados con este diagrama.*

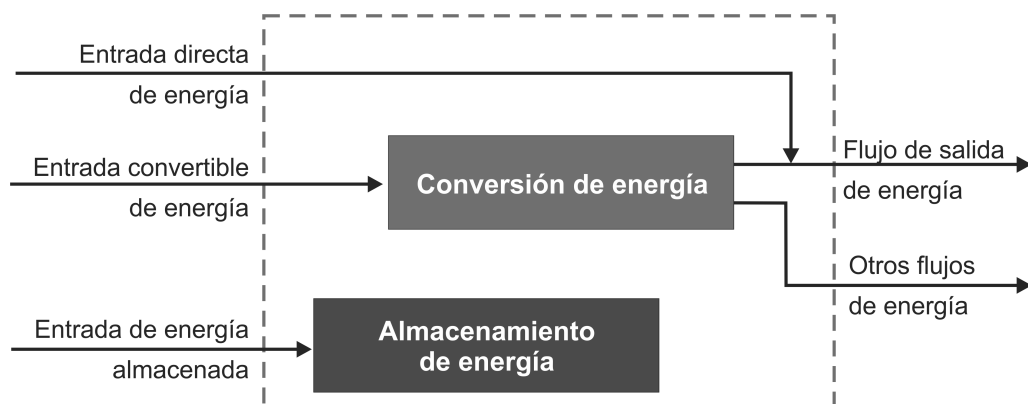


Figura 2.5 – Proceso de generación y almacenamiento de energía.

Es importante señalar, que estos diagramas son muy importantes para la comprensión cualitativa de los procesos y como veremos más adelante (este tema se discutirá en detalle en el Capítulo 3) para la aplicación de la teoría de sistemas de control. Pero, para poder realizar estudios cuantitativos y detallados de los procesos, cada uno de los bloques de este diagrama debe estar asociado a una ecuación matemática (o a un conjunto de ecuaciones) que describa(n) la relación entre las diferentes variables involucradas en el proceso.

El término “variable” se utiliza para describir una determinada propiedad relacionada con el proceso y que puede variar con el tiempo. Esta variación puede ser causada por modificaciones del proceso o por la evolución natural de sus características físico-químicas. Por ejemplo, en el caso del proceso del ventilador, la velocidad de las aspas podría considerarse la variable de proceso que se verá modificada en el tiempo por el efecto que ocasiona la manipulación del potenciómetro, que en este caso sería la variable manipulada de nuestro proceso.

2.2. ¿Control de procesos?

La palabra “control” es muy utilizada en el día a día en diversas situaciones: hablamos de controlar los gastos, controlar el peso, controlar el colesterol, etc. Controlar, significa tomar algunas acciones para causar cierto efecto en una propiedad o situación en nuestras vidas. Por ejemplo, para poder controlar nuestro peso, debemos tomar como acción la ingesta de una determinada cantidad de alimentos que esté de acuerdo con nuestra rutina de vida y el peso que se desea tener. Así, si consideramos nuestro cuerpo como un proceso que transforma los alimentos que ingerimos en energía y aumento de peso, debemos manipular la cantidad de alimentos que podemos ingerir para tener como resultado el peso deseado.

Usando el ejemplo anterior podemos introducir intuitivamente algunas ideas importantes asociadas con el control de procesos. Para controlar nuestro peso necesitamos medirlo, por lo que usaremos por ejemplo una báscula para este propósito. Conociendo el peso, lo compararemos con el peso que nos gustaría tener, es decir, con un valor de “referencia” que definimos previamente, usando algún criterio. Dependiendo de la diferencia entre el peso medido y el deseado, tomaremos una decisión, que será nuestra acción de control. Aquí usaremos algo de lógica basada en las matemáticas de una dieta. Finalmente, la acción de control se realizará a la hora de preparar nuestra comida. En ese paso final, manipulamos una variable (alimentos ingeridos) para afectar el proceso e intentar llevar nuestro peso al valor deseado.

La Figura 2.6 muestra el diagrama de bloques de este sistema de control. Antes de analizar con detalles estas operaciones, podemos señalar que tenemos tres pasos fundamentales, la medición, el control y la actuación.

Así, en general, controlar un proceso significa definir determinadas acciones a realizar sobre las variables que podemos manipular en el proceso, de tal forma que podamos conseguir que los productos del proceso cumplan determinadas condiciones o tengan determinadas propiedades.

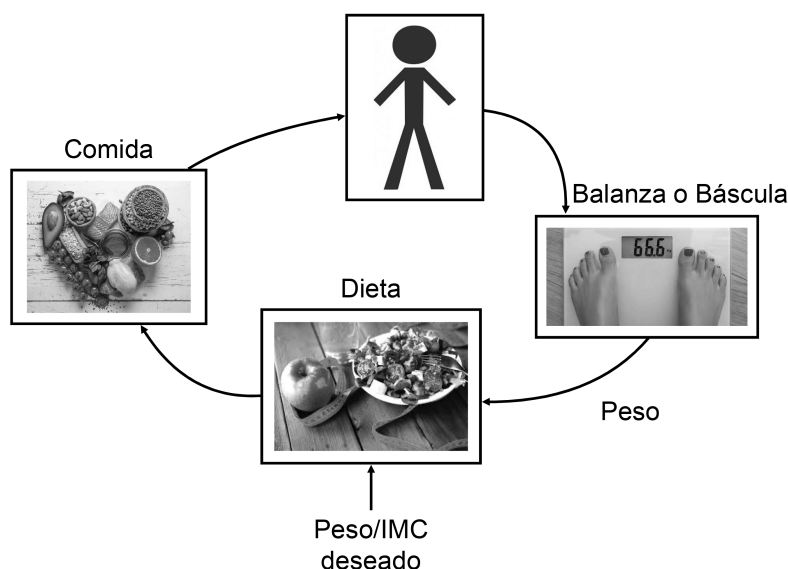


Figura 2.6 – Esquema para el control de peso.

Para el ejemplo del proceso de calentamiento del agua de la olla, controlar el proceso significa determinar cómo vamos a manipular la perilla que regula la entrada de gas para conseguir una determinada temperatura del agua, normalmente después de pasado un determinado tiempo. Tenga en cuenta que calentar el agua a una determinada temperatura puede no ser una solución satisfactoria para el usuario si tarda mucho tiempo en alcanzar la temperatura deseada. El concepto de controlar un cierto proceso, aunque simple, está directamente asociado a los objetivos que debe alcanzar este proceso, entre otras consideraciones.

Los ingenieros e ingenieras de control deben ser capaces de comprender y diseñar sistemas de control para los más variados tipos de procesos, ya sean industriales o cotidianos; deben saber diseñar estos sistemas de manera que se puedan cumplir ciertos requisitos.

Estos requisitos, llamados “requisitos de control”, en general, se pueden dividir en cinco categorías principales, como se muestra a continuación:

1. **Requisitos de costo-beneficio:** los sistemas de control pueden dise-

ñarse para asegurar que el proceso mantenga un nivel específico de costo-beneficio. En la práctica, la gran mayoría de procesos deben controlarse de tal manera que su retorno económico sea mayor que su costo de producción. Por ejemplo, en un sistema de producción de energía fotovoltaica, podemos considerar como uno de los requisitos de costo-beneficio que el costo de instalación de los paneles sea amortizado por la economía en la factura de energía eléctrica en un plazo máximo de algunos años.

2. **Requisitos de seguridad:** la seguridad de los procesos industriales es siempre una prioridad, principalmente para reducir el riesgo de accidentes. De esta forma, muchos sistemas de control se diseñan para evitar situaciones de falla y paradas forzadas. En una caldera pequeña, como en el ejemplo de la Figura 2.4, se deben garantizar niveles seguros de temperatura y presión, de tal manera que nunca ocurran explosiones.
3. **Regulación ambiental:** los asuntos ambientales a menudo se tienen en cuenta para el correcto funcionamiento de los procesos. Los sistemas de control deben asegurar, por ejemplo, que la eliminación de algún material en la naturaleza o la reintroducción de este material en alguna etapa intermedia del proceso se realice de acuerdo con la legislación vigente. En la industria de curtiembres, por ejemplo, la piel de buey se utiliza para la producción de prendas de vestir y materiales de cuero. Este tipo de proceso suele generar una gran cantidad de residuos orgánicos, que deben eliminarse adecuadamente.
4. **Restricciones operativas:** las restricciones sobre el correcto funcionamiento del propio proceso deben tenerse en cuenta al diseñar los sistemas de control. Estas restricciones son mecánicas o físicas (relativas al proceso en sí) o normativas. En cuanto a las primeras, estas se refieren a los límites reales de la operación del proceso, es decir, cuanto

se puede aumentar o disminuir una determinada variable del sistema. Por ejemplo, no se pueden exceder las cargas máximas preestablecidas de una máquina o planear tener más cantidad de materia prima que la disponible. En cuanto a las segundas, se debe observar el conjunto de reglas (internas o externas) que rigen el tipo de actividad que se desarrolla en el proceso. Por lo tanto, los procesos siempre deben controlarse de tal manera que se respeten estos estándares. En una industria de cerámica, por ejemplo, es necesario definir las temperaturas máximas dentro del horno, de tal forma que las piezas cerámicas no pierdan resistencia mecánica por ser sometidas a temperaturas excesivas.

5. **Requisitos de desempeño:** finalmente, un sistema de control siempre debe diseñarse de tal manera que el proceso controlado se comporte de acuerdo con un desempeño preestablecido. Por ejemplo, un sistema de control de un automóvil autónomo debe garantizar que el automóvil se autoconduzca de acuerdo con la ruta planificada por el usuario y que llegue a los destinos en los tiempos predefinidos. En general, los requisitos de desempeño se refieren a la optimización de la operación del proceso, a la atenuación de efectos indeseables causados por perturbaciones externas, al mantenimiento de la estabilidad del proceso y también al cumplimiento de tiempos para las respuestas transitorias (por ejemplo para la transición de un estado a otro del proceso).

2.3. Comprendiendo el control de procesos

Teniendo en cuenta las cinco categorías de requisitos de control establecidos anteriormente, los procesos deben controlarse de tal manera que las mismas de hecho puedan ser garantizadas. Para ello, se debe monitorear el proceso a controlar y las intervenciones deben realizarse de manera autónoma e “inteligente”. Vamos a formalizar algunos de estos conceptos mediante

el diagrama de bloques que se muestra en la Figura 2.7.

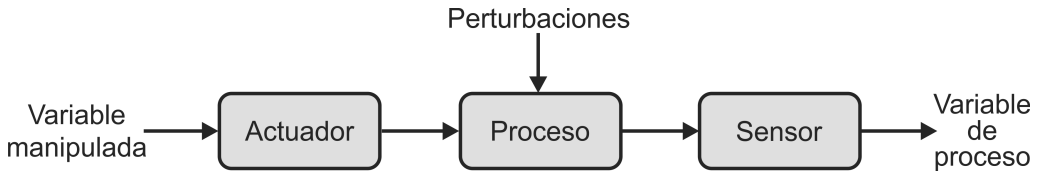


Figura 2.7 – Diagrama de bloques: actuador, proceso y sensor.

En esta figura se muestran diversas variables y algunos elementos que están presentes en prácticamente todos los procesos. La “variable de proceso” que se muestra en la figura, también llamada “variable controlada”, representa alguna propiedad del producto del proceso que queremos mantener bajo control, por ejemplo, la temperatura de un fluido, la velocidad de un ventilador, la cantidad de azúcar producida por hora en una fábrica, etc. Para poder observar o conocer el estado de esta variable, en la mayoría de los casos necesitamos un sensor o medidor (por ejemplo, un termómetro para medir una temperatura). La “variable de control”, también denominada “variable manipulada”, representa la variable que debe ser manipulada por el operador o por el sistema de control automático. Para eso, necesitamos un elemento actuador, que conecta la manipulación con el proceso, por ejemplo cuando giramos la perilla (mando) de una cocina a gas, hay una válvula (actuador) que permite que el gas pase a través de la tubería hacia el quemador. Como ya fue mencionado, la manipulación de la variable de control tiene como objetivo que la variable de proceso respete los requisitos de control establecidos, y esto debe lograrse a pesar de posibles disturbios o perturbaciones. Las perturbaciones son aquellas variables que afectan el resultado del proceso, es decir, el valor de la variable de proceso, pero sobre las cuales no tenemos el poder de controlar (no podemos manipular).

Formalizaremos estos conceptos y citaremos algunos ejemplos adicionales.

- **Variable de control o variable manipulada** es la variable del sistema

que el operador o controlador automático manipula para causar un efecto sobre la variable del proceso.

- **Variable de proceso** o **variable controlada** es la variable física del proceso que representa una característica de interés para el mismo y que se verá afectada por la manipulación de la variable de control.
- **Las perturbaciones** son las variables que modifican directa o indirectamente el comportamiento del proceso alterando la variable de proceso. No hay forma de manipular una perturbación. En general, las perturbaciones de un proceso son variables externas (secundarias) al sistema de control, tales como fricción, variaciones externas de temperatura, vibraciones, variables no identificables, carga o torque externo, fallas y ruido de medición.

Asimismo, se deben presentar las definiciones de los bloques de la representación del proceso correspondientes a la actuación y medición:

- **Actuador:** es el componente (generalmente electromecánico) capaz de transformar la variable de control (que generalmente es de baja potencia) en una cantidad capaz de modificar el proceso. Por ejemplo, una válvula que controla el caudal de agua en una tubería que alimenta un tanque es, de hecho un actuador, ya que recibe una señal eléctrica que se transforma en un movimiento mecánico para estrangular el paso de fluido y en consecuencia, reducir el caudal de agua que ingresa al tanque, con lo que se consigue variar el nivel de agua en el tanque. Una válvula mecánica manual también es un actuador que permite que el operador use la posición del mando de la válvula para modificar el caudal en la tubería.
- **Sensor:** es un componente capaz de traducir una magnitud física en otra que pueda ser interpretada por el sistema de control (generalmente una corriente o tensión eléctrica), o en una visualización gráfica que

pueda ser entendida por el operador. Un termopar, por ejemplo, es un sensor de temperatura que transforma la variación de temperatura del líquido en el que está sumergido en un valor de voltaje eléctrico. La temperatura también se puede medir con un termómetro de mercurio, que le da al usuario una indicación visual, a través del nivel de una columna de mercurio de altura variable dependiendo de la temperatura que se mide.

Es necesario mencionar un detalle importante relacionado a las diferentes nomenclaturas utilizadas en la academia y en la industria para las variables y elementos de control. En la industria, es normal utilizar los términos variable de control o variable manipulada para la actuación sobre el proceso; ya en el mundo académico, es más habitual utilizar el término “variable de entrada” (o apenas “entrada”). La variable de interés, o la que desea controlar, se le llama en el contexto industrial como variable de proceso o variable controlada; ya en el mundo académico, es más habitual utilizar el nombre: “salida del proceso” (o apenas “salida”).

Esta designación de entradas y salidas de un proceso está estrechamente asociada con el uso de los diagramas de bloques como una representación matemática del proceso, pero debemos tener cuidado al usar esta terminología, ya que la salida del proceso, desde el punto de vista del control, no es necesariamente la salida del producto de un proceso. Por ejemplo, en un sistema de control de temperatura de agua, la salida física del sistema es agua caliente, pero la variable de proceso, en términos de control, es la temperatura del agua.

A continuación presentaremos algunos ejemplos de procesos para que podamos identificar los elementos y variables involucrados.

2.3.1. Ejemplos de procesos y sus variables

Ejemplo 6 *En la Figura 2.8, presentamos una ducha eléctrica. Este aparato se utiliza para calentar el agua del baño transformando energía eléctrica en energía térmica. La ducha tiene en su interior un pequeño depósito que recibe el agua fría de la tubería y en el que se aloja una resistencia eléctrica. El agua que pasa por este pequeño depósito se calienta con el calor generado por la resistencia y sale de la ducha con una temperatura superior a la de la entrada. Esta temperatura depende de cuánta energía se disipa en la resistencia y cuánto tiempo permanece el agua en el depósito. Así, la ducha es capaz de lograr un incremento de la temperatura del agua, y el valor de temperatura final a la salida será igual a la suma de este incremento con la temperatura de entrada.*

En este proceso, podemos definir directamente la temperatura del agua que sale de la ducha como la variable de proceso, ya que esta es la variable de interés controlada por el usuario. La temperatura de entrada del agua es sin duda una perturbación, ya que no tenemos control sobre ella y sus variaciones afectan a la variable de proceso. Para la variable manipulada, podemos considerar dos casos. Si nuestra ducha no tiene la posibilidad de variar la potencia eléctrica aplicada a la resistencia, la única variable de control es el caudal de agua, regulado a través de un grifo instalado en la tubería. Tenga en cuenta que esta variable de control tiene un efecto opuesto sobre la temperatura, ya que al aumentar el caudal disminuimos la temperatura de salida, si mantenemos todas las demás variables en valores fijos. En el caso de que la ducha permita variar la potencia eléctrica aplicada a la resistencia, tendremos la posibilidad de utilizar, además del caudal, la potencia como una variable de control para el proceso. En la práctica, como usuarios u operadores de la ducha con potencia variable, normalmente utilizamos ambas variables de control en este proceso, ya que de esta forma podemos regular la temperatura que queramos y también el caudal (dentro de unos límites) para tener un baño más agradable.



Figura 2.8 – Ejemplo de ducha eléctrica con potencia variable.

Ahora identificaremos los otros elementos del proceso. La ducha no suele tener sensor de temperatura, utilizamos nuestro propio cuerpo para comprobar la temperatura, sin tener en cuenta el valor exacto, sino solo la sensación de temperatura agradable. Una ducha más sofisticada podría tener un termómetro con una pantalla digital para indicar la temperatura del agua. En cuanto a los actuadores, podemos identificar dos en este proceso: el grifo (que actúa como válvula), que nos permite modificar el caudal y en consecuencia la temperatura del agua y el accionamiento mecánico (selector) de la ducha, que nos permite modificar la potencia eléctrica consumirá en la resistencia.

Ejemplo 7 *La Figura 2.9 muestra una ilustración de un sistema de suspensión automotriz, que consta de un amortiguador de amortiguación variable y un resorte de rigidez constante. Este sistema tiene como finalidad minimizar la aceleración vertical del chasis del coche, con el objetivo de mejorar la comodidad del pasajero, independientemente del estado de la carretera por la que transita el vehículo. Por lo tanto, la aceleración vertical del automóvil es la variable de proceso para este sistema, la variable de control es la fuerza*

disipativa impuesta por el amortiguador. El actuador en este proceso es el amortiguador de amortiguación variable y el sensor es el transductor que mide la aceleración vertical instantánea del automóvil, acoplada a su centro de masa. Las características verticales de la carretera, como los baches, representan las perturbaciones de este proceso.

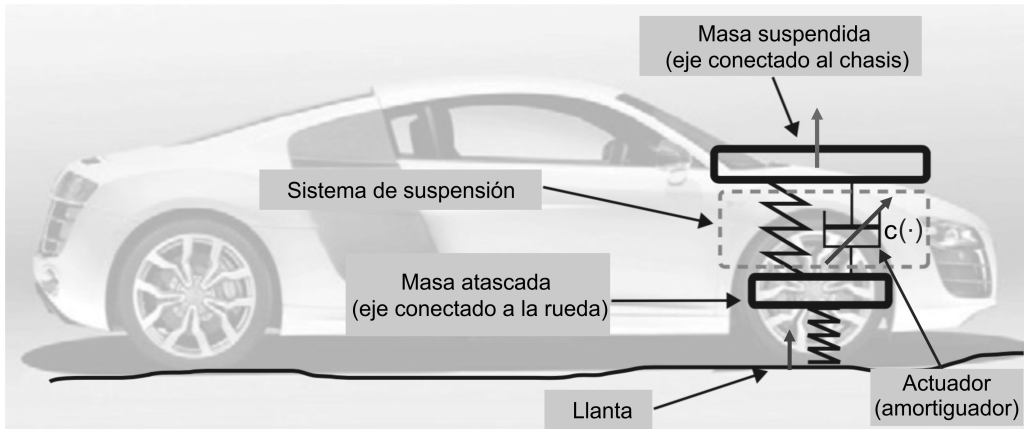


Figura 2.9 – Sistema de suspensión automotriz.

Ejemplo 8 En la Figura 2.10, mostramos una representación gráfica de una caldera de gas, utilizada industrialmente para calentar agua. Este sistema consta de un quemador de gas y una tubería interna, para hacer circular el agua que entra en la caldera. Estos tubos están dispuestos de tal manera que en contacto con la llama que se produce al quemar el gas calientan el agua que pasa por ellos.

El propósito de este proceso es aumentar la temperatura del agua que ingresa al calentador hasta una temperatura determinada. Por lo tanto, la temperatura del agua de salida es la variable de proceso (T en la figura), y la apertura de la válvula que controla el caudal de gas (V_2 en la figura) es la variable de control. Al igual que en el caso de la ducha, la temperatura del agua que ingresa a la tubería de la caldera y su respectivo caudal modificarán la temperatura de salida del agua, y si consideramos que no tenemos forma de controlarlas, se considerarán perturbaciones del proceso.

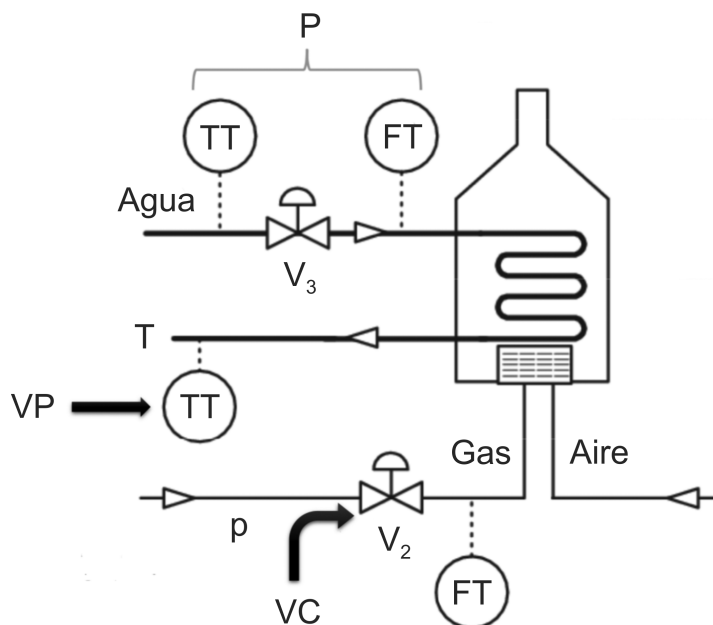


Figura 2.10 – Caldera a gas con control de temperatura (variable de proceso) usando el caudal de gas (variable de control).

En la Figura 2.10, podemos ver los actuadores y sensores instalados siendo representados respectivamente, por las válvulas (V_2 y V_3) y los medidores de temperatura (símbolo TT , en ingles temperature transducer) y caudal (símbolo FT , en ingles flow trasducer). Se observa que el sistema cuenta con sensores para la variable de proceso, pero también para otras variables, en este caso se mide el caudal de gas y agua que ingresa al sistema, así como la temperatura del agua que ingresa al sistema. Este tipo de medida auxiliar puede ser importante para mejorar el sistema de control, como veremos en los siguientes capítulos.

Como en este proceso tenemos dos actuadores, que son las válvulas que controlan el caudal de gas y agua entrando en la caldera y medidores de temperatura y caudal de agua, podríamos considerar la caldera como un sistema en el que operamos simultáneamente en dos variables manipuladas para controlar simultáneamente dos variables de proceso (caudal y tempe-

ratura del agua a la salida de la caldera). Este tipo de situación es bastante común en la práctica y se denomina sistema multivariable. Analizaremos este punto con más detalle en el siguiente apartado.

2.3.2. Procesos monovariantes y multivariantes

Dependiendo del número de variables de control y de proceso que se consideran en un sistema, el proceso se puede categorizar como:

- Procesos monovariantes o de una única entrada y una única salida (SISO, del inglés *single input single output*). Son aquellos que tienen solo una variable de proceso y una variable de control. En este caso, todas las demás variables que modifican el producto final de un proceso SISO son consideradas perturbaciones.
- Procesos multivariantes o con múltiples entradas y salidas (MIMO, del inglés *multiple inputs multiple outputs*). Son aquellos que tienen más de una variable de proceso y/o más de una variable de control. Lógicamente estos procesos tienen más de un sensor y/o actuador.

Además de la caldera mencionada anteriormente, citaremos otros ejemplos de procesos MIMO.

El proceso asociado al control de vuelo de un avión también es del tipo MIMO, ya que necesitamos controlar, como mínimo, la velocidad del avión, su altitud y su inclinación con relación al eje horizontal. En este caso, es necesario actuar a través de la potencia de los motores y de la posición del timón y de los controles aerodinámicos de las alas (*flaps*).

Los sistemas de cultivo en invernaderos necesitan un control adecuado de la humedad y la temperatura dentro del invernadero para conseguir que las condiciones climáticas dentro del mismo sean las apropiadas para el crecimiento de las plantas. En la práctica, el control de estos invernaderos se lleva a cabo calentando o enfriando el ambiente y rociando con agua el aire

en su interior. Éste es un proceso con dos variables de proceso (temperatura y humedad) y varias variables de control (energía del calentador, apertura de ventanas, inyectores de agua).

2.3.3. Sistemas de control en lazo cerrado manual y automático

La estructura de implementación de los sistemas de control más utilizada en la industria (y en la investigación académica) es la llamada estrategia de “control en lazo cerrado” o “control realimentado”.

El término lazo (o bucle) cerrado se refiere al esquema de implementación ilustrado por medio de un diagrama de bloques mostrado en la Figura 2.11. Comparando esta figura con la Figura 2.7, notamos que se agregó al diagrama un nuevo bloque, que se refiere al control. Este bloque recibe una medida de la variable de proceso proveniente de un sensor, la cual después de una etapa de procesamiento de la información recibida, envía un comando al proceso a través del actuador. En esta estructura de control, “cerramos un bucle”, a través del bloque de control, entre la variable de proceso y la variable manipulada (entrada y salida del proceso, como se muestra en la Figura 2.11). Este bloque de control generalmente recibe (o usa internamente) una señal de referencia, que se utiliza para expresar los requisitos operativos de la variable de proceso.

Los sistemas de control en bucle cerrado también son denominados como sistemas realimentados (o retroalimentados), debido al uso de la variable de proceso por parte del controlador para definir el valor de la variable manipulada. En inglés, el término usado para realimentación es *feedback* y, para sistemas realimentados, es *feedback systems*.

Con estos nuevos elementos y definiciones podemos retomar el ejemplo del sistema de control de peso de una persona (Figura 2.6), ilustrado al comienzo de este capítulo. Vamos a asociar los bloques de la estructura de

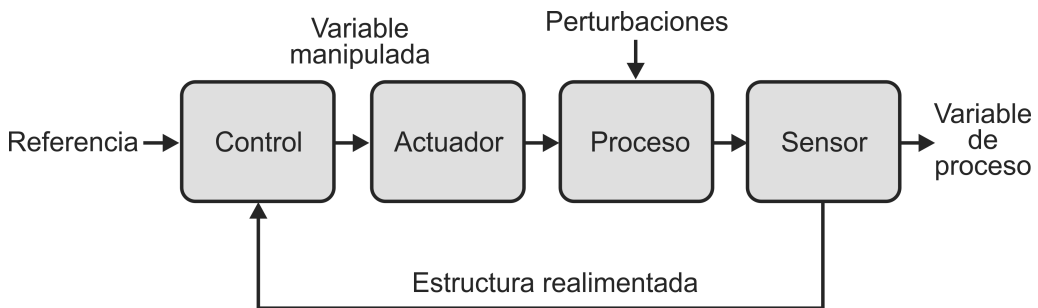


Figura 2.11 – Diagrama del sistema de control realimentado: actuador, proceso, sensor y controlador.

control de retroalimentación de la Figura 2.11, a este problema. La persona que controla su peso actúa en el proceso al ingerir un alimento. El actuador, en este caso, representa la preparación e ingestión de alimentos. La cantidad y tipo de alimento que debe ser ingerido se calcula con una dieta, lo que constituye una determinada estrategia de control. Y esta dieta utiliza la medida del peso de la persona y un valor de peso deseado (que es el valor de referencia) para definir la acción de control, por lo que se trata de un sistema realimentado. Según la nomenclatura de control de procesos, decimos que este sistema de control es de tipo manual, ya que una persona u operador humano toma decisiones de control en base a la observación de la salida del proceso (peso medido) y manipula manualmente el actuador del sistema (en este caso, la comida ingerida).

Los sistemas de control en bucle cerrado siempre se pueden representar mediante un diagrama de bloques como el de la figura anterior. Sin embargo, destacamos que, en ocasiones, algunos elementos físicos se confunden o se mezclan; hay casos en los que el actuador, el sensor y el controlador están juntos en un solo elemento/equipo. Vamos a estudiar un ejemplo muy simple de control de bucle cerrado en el que esto sucede.

Ejemplo 9 *Considere un tanque de agua residencial con un flotador mecánico instalado en la tubería de entrada de agua. El flotador se utiliza para controlar el nivel del agua en tanque, con el objetivo de permitir la entrada*

de agua mientras haya un consumo para que el nivel se mantenga siempre próximo a una determinada altura. El flotador tiene, en su extremo, una bola de plástico que en este caso funciona como sensor. Las variaciones del nivel del agua son transformadas en variaciones de posición de la varilla del flotador. Esta varilla está conectada, a su vez, a una válvula (que físicamente forma parte del mismo flotador) que regula el paso del agua al tanque, en función de la posición de la varilla. Nótese que el flotador mecánico es, al mismo tiempo que el sensor, también el actuador en este proceso, que manipula la entrada de agua en el tanque. Finalmente, la regulación mecánica y la geometría del conjunto bola-varilla-válvula definen la estrategia de control, es decir, cuál debe ser la apertura de la válvula para cada posición de la bola plástica, que se mueve flotando en el agua del tanque. Boyas de diferentes tamaños y formas ejecutarán diferentes estrategias de control. Por tanto, es claro que el flotador mecánico mide, controla y actúa en el proceso de regulación de nivel en el depósito de agua, configurándose como un sistema de control automático que opera en lazo cerrado: hay una realimentación del nivel de agua medido hacia la apertura de la válvula de entrada de agua en el tanque.

Este sistema de control se considera automático, ya que actúa de forma independiente y autónoma, sin necesidad de que un operador humano realice ninguna acción después de la instalación y ajuste del sistema. Destacamos que una operación de control manual de este proceso podría implementarse de manera sencilla, mediante la instalación de un grifo en la entrada de agua al tanque y un indicador de nivel en la parte exterior del mismo. Con estos elementos, un operador realizaría el control, vigilando el nivel del agua en el tanque para decidir cuándo y cuánto abrir el grifo, para que se reponga el agua consumida. Tenga en cuenta que la estrategia de control permanecería en bucle cerrado, ya que el operador toma las decisiones de control basándose en el valor de la variable de proceso.

En la industria de procesos podemos encontrar varios sistemas que ope-

ran tanto en modo manual como automático, dependiendo de las necesidades y requerimientos de control. Sin embargo, destacamos que los procesos han sido cada vez más automatizados, pues, en esta condición, consiguen mayor repetibilidad, precisión y confiabilidad en sus acciones, en comparación con las operaciones resultantes de una operación manual, por parte de un ser humano.

La retroalimentación regula de forma natural muchos procesos físicos y biológicos, en los que el bucle se “cierra” de forma natural. En los sistemas de control proyectados por el hombre, tanto manuales como automáticos, tratamos de reproducir esta estructura de realimentación para mejorar el comportamiento del proceso.

El control de retroalimentación manual, en el que un operador “cierra el bucle”, se utiliza en prácticamente todas nuestras acciones del día a día. Por ejemplo, cuando cerramos una ventana porque sentimos frío, estamos realizando el control de temperatura del ambiente, midiendo su temperatura con nuestro cuerpo (sensor) y tomando la decisión de cerrar la ventana (control) con nuestras manos (actuador).

Esta operación de control en bucle cerrado también se puede ejemplificar con otras situaciones cotidianas. Para recoger un objeto con nuestras manos, utilizamos una estrategia de retroalimentación, ya que nuestro cerebro (control) decide la posición correcta de nuestras manos y brazos (actuadores) en función de la información de nuestra visión (sensor). Acercamos nuestras manos al objeto de acuerdo con una ley de control estipulada por el cerebro, que procesa la información de distancia entre el objeto y nuestras manos.

A diferencia del control de bucle cerrado, también existe lo que llamamos control de bucle abierto. En este tipo de implementación, la acción sobre el proceso controlado se realiza sin utilizar información de su salida. Por ejemplo, en el caso del control de nivel del tanque de agua, se podría realizar una implementación de bucle abierto a través de un grifo en la entrada de agua al tanque, cuya operación consistiría en abrir el grifo en una posición

determinada, dejando el nivel del agua en el tanque variar libremente. Si la cantidad de agua que entra al tanque por el grifo es mayor que el consumo, el nivel aumentará, caso contrario disminuirá. Tenga en cuenta que la acción de control (definida por la apertura constante del grifo) no está influenciada por la variable del proceso (nivel de agua). La Figura 2.12 muestra un diagrama de bloques para un sistema de control que opera en bucle abierto, en el que la señal de control se define sin utilizar la información de la variable del proceso, basándose únicamente en señales predefinidas, como por ejemplo una variable de referencia que define la apertura del grifo en el ejemplo anterior. Tenga en cuenta que las variables involucradas en este esquema son las mismas que las de la implementación de bucle cerrado.

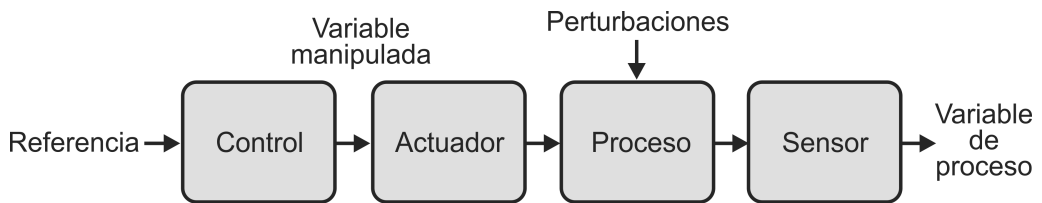


Figura 2.12 – Diagrama del sistema de control en bucle abierto: actuador, proceso, sensor y controlador.

Podemos ver varias ventajas de la operación en bucle cerrado sobre las operaciones en bucle abierto cuando buscamos un objetivo específico para la operación del proceso. Muchas de estas ventajas se discutirán a lo largo de este libro a partir del Capítulo 7.

Por ejemplo, para llenar el depósito de agua rápidamente hasta cierto nivel, es conveniente abrir el grifo por completo en un momento inicial, cuando el nivel está muy por debajo del valor deseado y, a medida que el nivel se acerca a este valor, podemos cerrar progresivamente el grifo. Nótese que la ley de control que define el valor del caudal de agua que ingresa al depósito depende de la medida del nivel de agua, que puede variar en cualquier momento en que haya consumo de agua. En otras palabras, los sistemas de control en bucle cerrado se ven menos afectados por perturbaciones, ya que

la ley de control se da de acuerdo a la medición instantánea de la variable de proceso, guiada en la búsqueda de un objetivo predefinido. Por otro lado, con un control en bucle abierto, no podríamos llevar a cabo la regulación de nivel de una manera tan sencilla, a menos que supiéramos, de antemano, cómo serían las variaciones en el consumo de agua a lo largo del tiempo.

Por otro lado, el control en bucle abierto puede ser útil, y se utiliza muchas veces como complemento de un control de bucle cerrado, para mejorar el funcionamiento del proceso. Esta configuración con las dos estrategias es interesante en procesos con perturbaciones mensurables o cuando conocemos muy bien el proceso y podemos predecir su comportamiento futuro. Un ejemplo de control en bucle abierto muy utilizado es el control conocido como anticipatorio o prealimentado (*feed-forward*, en inglés), en el que, una vez conocida la perturbación (o cómo se comporta el proceso ante ella), actuamos, en bucle abierto, para intentar anticipar variaciones en la variable de proceso. Otro caso es cuando manipulamos la variable manipulada del proceso anticipándonos a lo que sucederá con la variable de proceso. Presentaremos un ejemplo del día a día que ilustra el uso del control anticipatorio en bucle abierto y del control retroalimentado en un mismo proceso, ambos implementados manualmente.

Ejemplo 10 *Considere el ejemplo de una persona regulando la temperatura de su ducha eléctrica a la hora del baño, en la que la temperatura está regulada por el caudal de agua, determinado por la apertura de un grifo. Esta persona sabe bien cómo funciona la ducha y por la experiencia previa acumulada en su funcionamiento, sabe que necesita abrir el grifo hasta una determinada posición para obtener, aproximadamente, la temperatura deseada para un buen baño. De esta forma, sin medir la temperatura del agua, la persona realiza una primera acción de control en bucle abierto, de antemano, abriendo el registro a la posición predeterminada, prediciendo que esta apertura será suficiente para que el agua se caliente hasta una temperatura determinada, generalmente próxima de la deseada. La persona también*

sabe que con esta operación, por lo general, no podrá alcanzar la temperatura ideal con precisión y, por lo tanto, después de unos segundos de la primera acción, inicia una operación de control en bucle cerrado: mientras mide la temperatura del agua con la mano (utilizada como sensor), la persona decide cuánto aumentar o disminuir el caudal de agua (abrir o cerrar el grifo) para que el agua alcance la temperatura deseada. Esta operación de bucle cerrado requiere una operación generalmente más lenta y de pequeños movimientos para un ajuste de temperatura adecuado. En este ejemplo de control manual, la combinación de una acción rápida, en bucle abierto, anticipatoria y una acción retroalimentada más lenta, permite el correcto funcionamiento del proceso de regulación de la temperatura del agua de una ducha eléctrica para un buen baño. Las ventajas de las dos estrategias son usadas para mejorar el funcionamiento del sistema.

El ejemplo anterior ilustra cómo se pueden utilizar y asociar diferentes formas de control de tal manera que se obtengan determinadas condiciones para el funcionamiento de un proceso. Para ello, sin embargo, destacamos que el conocimiento del comportamiento del proceso es importante para una buena solución del problema. En el léxico de la ingeniería de control pretendemos comprender y describir matemáticamente los fenómenos asociados al funcionamiento de los procesos (a través de modelos), de tal manera que podamos elaborar leyes de control automático, que implementadas en dispositivos electrónicos o electromecánicos, permitan el funcionamiento autónomo de la mayoría de los procesos o sistemas. Dedicaremos los próximos capítulos de este libro al estudio de este tema.

2.4. Comentarios finales

Este capítulo tuvo como objetivo introducir intuitivamente algunos conceptos relacionados con los procesos y sus sistemas de medición, actuación y control. Uno de los aspectos principales de este análisis es la consideración

de los sistemas como procesos con variables asociadas y la comprensión de cómo podemos interactuar con ellos para lograr ciertos objetivos. El segundo concepto muy importante presentado, también de manera intuitiva, es el del control en bucle cerrado, que permite actuar en un proceso con base en una ley de control que depende de la observación de su salida. Finalmente, vimos, utilizando algunos ejemplos, cómo la implementación de un sistema de control en un proceso crea la posibilidad de modificar su comportamiento, en busca de objetivos de operación. En los siguientes capítulos, entraremos en mayor detalle sobre varios aspectos discutidos aquí.

2.5. Lectura complementaria

La mayoría de los libros de texto sobre sistemas de control o de teoría del control de procesos presentan en sus capítulos iniciales ideas básicas de sistemas de control y casos simples de operación de procesos. Por lo general, estos libros están destinados a estudiantes con un conocimiento de fundamentos matemáticos más avanzados que los que se utilizan en este libro. Entonces, para aquellos interesados en profundizar sus conocimientos en el tema, sugerimos algunas referencias que utilizan este enfoque matemático más complejo.

- FRANKLIN, G.; POWELL, J.; WORKMAN, M. *Feedback Control of Dynamic Systems*. 5. ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2002.
- STEPHANOPOULOS, G. *Chemical process control*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall International, 1984.
- OLLERO, P.; CAMACHO, E. F. *Control e instrumentación de procesos químicos*. [S.l.]: Editora Síntesis, 2006.

Para una lectura relacionada a los conceptos de control sin necesidad de mayor profundidad matemática, sugerimos:

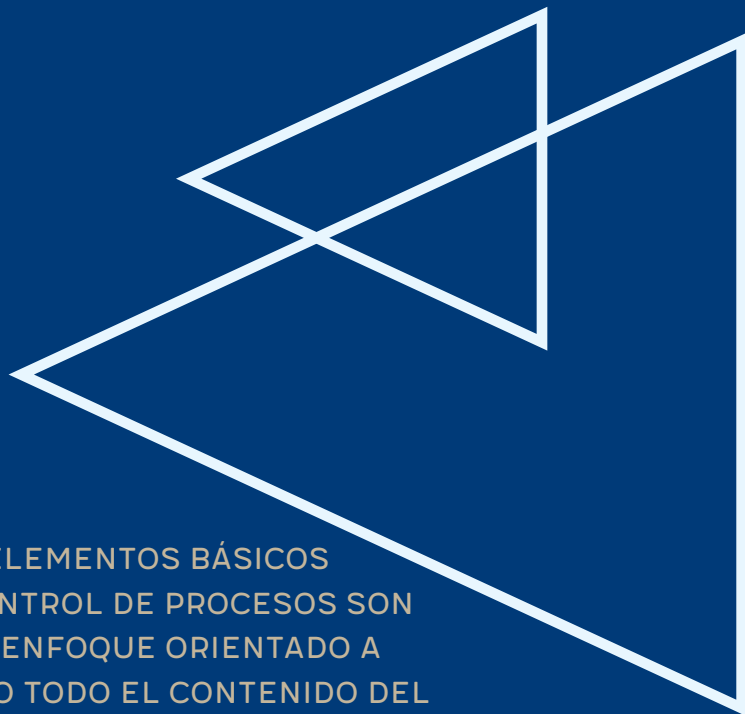
- ALBERTOS, P.; MAREELS, I. *Feedback and control for everyone*. [S.l.]: Springer, 2010.

Lista de ejercicios

1. ¿Cuál es la diferencia entre variables manipuladas, controladas y perturbaciones? En general, ¿cómo se relacionan con los sensores y actuadores presentes en una planta?
2. ¿La clasificación de variables en manipuladas, controladas y perturbaciones es una consecuencia intrínseca del proceso físico o estas clasificaciones pueden variar según los objetivos de control, sensores y actuadores disponibles?
3. Enumere algunos objetivos (al menos 3) que generalmente están relacionados con el uso de un sistema de control.
4. Considere el sistema de control de una ducha eléctrica.
 - Dibuje un esquema físico simplificado, sin control, del sistema (por ejemplo, ducha + válvula + resistencia).
 - Pensando en un sistema de control de temperatura del agua, identificar variables manipuladas, controladas y perturbaciones en el esquema anterior.
 - Proponer un sistema que permita controlar la temperatura del agua que sale de la ducha. No es necesario que entre en detalles eléctricos o matemáticos, pero identifique dónde se encuentran los sensores, actuadores y controladores (si los hay). También aclare cómo fluye la información en este sistema (en qué orden se leen/calculan/envían las variables, quién envía qué a quién, etc.).
 - Transforme su esquema de control/físico en un diagrama de bloques de la estructura de control.

5. Ahora considere el sistema de control de nivel de un tanque.

- Repita los pasos del ejercicio anterior para este nuevo sistema. Considere que puede controlar la apertura de una válvula en la parte superior del tanque (de donde proviene el agua), pero la válvula de salida del tanque no se puede modificar.
- ¿Qué se podría hacer si fuera posible medir la apertura de la válvula de salida del tanque (solo medir, no controlar)?
- ¿Qué debería cambiarse en el sistema de control propuesto si la posición de las válvulas se invierte? (La válvula controlable se instala en la parte inferior y la no controlable en la parte superior)



EN ESTE LIBRO, LOS ELEMENTOS BÁSICOS DE LA TEORÍA DEL CONTROL DE PROCESOS SON ANALIZADOS CON UN ENFOQUE ORIENTADO A PRINCIPIANTES. COMO TODO EL CONTENIDO DEL LIBRO SE DESARROLLA EN EL DOMINIO DEL TIEMPO, LOS ESTUDIANTES SOLO PRECISAN TENER CONOCIMIENTOS PREVIOS BÁSICOS DE FÍSICA Y CÁLCULO.

En este libro, se estudian las principales estrategias de control utilizadas en la práctica industrial: control *on-off*, P, PI y PID. Además, se analizan aspectos prácticos relacionados con la implementación de estas técnicas, como la presencia de perturbaciones, ruido de medición y saturación del actuador. Todos los pasos necesarios para el diseño de un sistema de control básico se tratan en el libro, desde el análisis de datos experimentales hasta la síntesis de la ley de control y su respectiva implementación en bucle cerrado. El libro también tiene varios ejercicios, problemas resueltos y actividades propuestas, así como guiones para experimentos prácticos que se puede desarrollar en un kit experimental de bajo costo, propuesto como una plataforma de validación de técnicas de control para principiantes.



www.blucher.com.br

Blucher



Clique aqui e:

VEJA NA LOJA

Introducción al Control de Procesos

Julio Elias Normey-Rico, Marcelo Menezes Morato

ISBN: 9786555064827

Páginas: 716

Formato: 17 x 24 cm

Ano de Publicação: 2022
